

Оценка критического радиуса изгиба графеновых антенн

А. Г. Черевко, Ю. В. Моргачев, Е. М. Ильин, А. И. Полубехин, В. И. Флегонтов

Определен параметр, характеризующий применимость гибких графеновых антенн, определена его связь с сопротивлением материала графеновых антенн постоянному току. Анализ проведен на основании эксперимента, компьютерного моделирования и мониторинга литературных данных.

Ключевые слова: графеновая антенна, печатные технологии, гибкие антенны, экологичная электроника.

1. Введение

Анализ развития рынка интернета вещей (ИВ) показывает его дальнейший экспоненциальный рост [1] (рис. 1).



Рис. 1. Тенденция потребления устройств интернета вещей

В результате в сфере ИВ будет использоваться около 3/5 всех электронных устройств уже к 2021 году.

Таким образом, с еще большей остротой возникает необходимость утилизации и переработки электронных отходов, которая стоит с начала 2000-х годов. Малозаметная в начале 2000-х годов, из-за экспоненциального роста количества доступных электронных устройств она превращается в одну из острых проблем экологии. Если оценивать количество выбрасываемых электронных устройств, которые могут быть подключены к интернету, то большая часть принадлежит к парадигме ИВ. Антенны являются одним из основных элементов ИВ. Для решения задач экологии целесообразно перейти от загрязняющих среду металлов к другим – экологичным – материалам. Таким материалом является графен, обладающий достаточно высокой проводимостью. Он дает возможность использовать экологичные подложки, например, бумагу или ткань.

Кроме того, графен – материал, на основе которого создается гибкая электроника. Для создания такой электроники может быть применена прогрессивная технология двумерной и

трехмерной печати, обеспечивающая масштабирование для удовлетворения нужд средне- и крупносерийного производства. Графеновые чернила по сравнению с металлическими аналогами кроме экологичности обладают такими преимуществами, как меньший вес, меньшая температура высушивания, отсутствие коррозии и низкая цена [2].

Активно разрабатываются методы печати графеновых антенн на биоразлагаемых подложках, например, использование напечатанных антенн на одежде позволит увеличить расстояние передачи данных для связи до двух раз и время жизни батареи мобильных телефонов [3] и также увеличить расстояние считывания RFID меток до 5 м [4].

Несмотря на большое число публикаций по разработке гибких графеновых антенн не решен вопрос о влиянии деформаций на характеристики антенн и не определен предельный (критический) радиус изгиба антенны. Настоящая работа частично устраняет этот пробел.

2. Критические радиусы изгиба графеновых антенн

Графеновые полосковые линии, по структуре аналогичные полоску графеновой дипольной антенны (рис. 2), напечатанные на бумажной подложке, подвергались изгибу контролируемого радиуса, r . При этом измерялось их сопротивление R на постоянном токе (рис. 3). Зависимость сопротивления от радиуса изгиба $R(r)$ имеет две ясно выраженные линейные ветви (асимптотики), соответствующие большим и малым радиусам изгиба, и переходную зону (кривые 1, 2, 3 на рис. 3). Путем аппроксимации линейных ветвей прямыми линиями определялась абсцисса их пересечения и соответствующий радиус, который можно считать критическим, поскольку в этой точке производная dR/dr асимптотик зависимости $R(r)$ меняет значение (пример построения – кривая 1 на рис. 3).

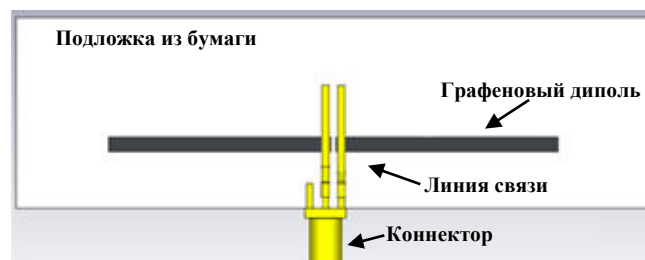


Рис. 2. Образец дипольной графеновой антенны на подложке из бумаги

Аналогично обрабатывались экспериментальные результаты для двухщелевой дипольной антенны [5] и результаты моделирования нашей дипольной антенны (рис. 2):

- зависимость коэффициента усиления (КУ) и коэффициента отражения (КО) напечатанной на бумаге графеновой антенны от радиуса изгиба, полученная нами путем обработки экспериментальных результатов [5] (кривые 4 и 5 на рис. 3);

- зависимость коэффициента направленного действия (КНД) дипольной графеновой антенны на подложке из бумаги и полиэстера от радиуса изгиба, полученная нами путем моделирования (кривые 6 и 7 на рис. 3).

Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1. Предельные(критические) радиусы изгиба графеновых антенн

Источник	Устройство	Подложка	Технология	Измеряемый параметр	r_c , мм
Наш эксперимент: Образец 1	Полосковая линия	Бумага	Трафаретная печать	Сопротивление, R	40.5
Образец 2	—” —	Бумага	—” —	R	50
Образец 3		Бумага		R	40
Наше моделирование: № 1	Дипольная антенна	Полиэстер		—” —	КНД
№ 2	—” —	Полиэстер	—” —	КНД	35
[5]	Двухщелевая дипольная антенна	Бумага	—” —	КУ	41
[5]	—” —	Бумага	—” —	КО	50

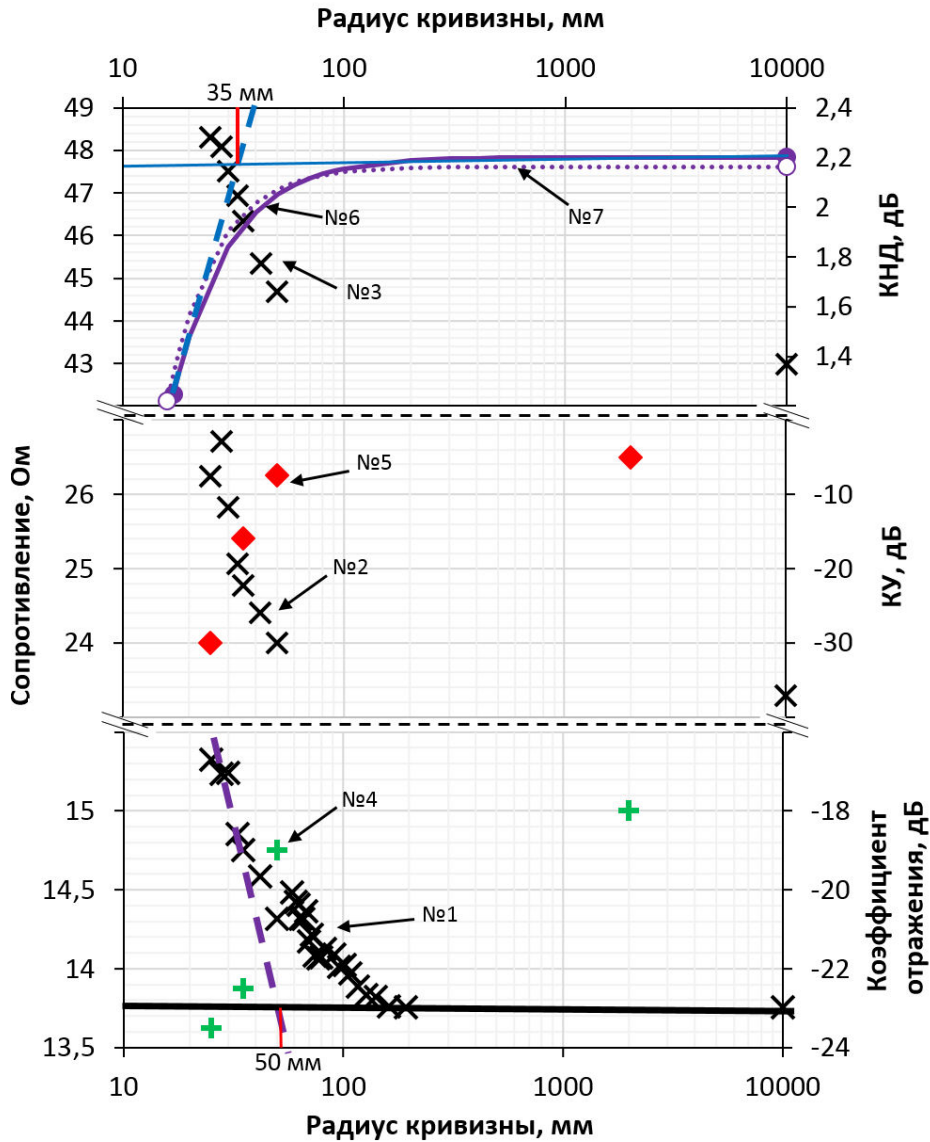


Рис. 3. Зависимость параметров антенн от их радиуса изгиба, r

Х – Сопротивление полоска, + – КО, ♦ – КУ, ○ – КНД, бумажная подложка, ● – КНД, подложка полиэстер

3. Обсуждение результатов

При нашем моделировании КНД дипольной графеновой антенны, как и в случаях моделирования электромагнитных параметров графеновых антенн, описанных в литературе, ограничения, связанные с влиянием деформации на механические свойства антенны, не учитывались. Наши результаты показывают, что зависимость КНД от радиуса изгиба дает значение $r_c = 35$ мм. В то же время эксперимент по измерению сопротивления полосков графена на постоянном токе дает диапазон критических радиусов изгиба $40 \text{ мм} \leq r_c \leq 50 \text{ мм}$. Поскольку причиной изменения сопротивления в этом случае является деформация графенового полоска, т.е. изменение его механических свойств, то можно полагать, что критические радиусы гибких графеновых антенн, определяемые из их электромагнитных свойств, должны лежать в этом диапазоне. Это предположение подтверждается экспериментальными критическими радиусами, определенными по КУ и КО двухщелевой дипольной антенны [5], которые лежат в этом диапазоне.

4. Выводы

Как показал анализ, предельные возможности гибких графеновых антенн ограничиваются не их конструкцией, а механическими характеристиками графена, его устойчивостью к деформации, поскольку критический радиус изгиба антенны, связанный с механическими свойствами графена, больше критического радиуса, определяемого конструктивными особенностями антенны.

Литература

1. IoT: number of connected devices worldwide 2012-2025 | Statista [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (дата обращения: 23.10.2019).
2. Akbari M., He H., Juuti J., Tentzeris M., Virkki J., Ukkonen L. 3D Printed and Photonicallу Cured Graphene UHF RFID Tags on Textile, Wood, and Cardboard Substrates // International Journal of Antennas and Propagation. 2017. P. 1–8.
3. AUSA – Bluewater Defense & Vorbeck Introduce Wearable Antenna – Soldier Systems Daily [Электронный ресурс]. URL: <http://soldiersystems.net/2015/10/14/ausa-blue-water-defense-vorbeck-introduce-wearable-antenna/> (дата обращения: 23.10.2019).
4. He H., Akbari M., Sydanheimo L., Ukkonen L., Virkki J. 3D-printed graphene and stretchable antennas for wearable RFID applications // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1109/isanp.2017.8228746> (дата обращения: 23.10.2019).
5. Huang X, Leng T, Zhu M, Zhang X, Chen J, Chang K, et al. Highly Flexible and Conductive Printed Graphene for Wireless Wearable Communications Applications // Scientific Reports. Dec. 2015. V. 5, № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1038/srep18298> (дата обращения: 23.10.2019).

Статья поступила в редакцию 11.11.2019.

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики, заведующий лабораторией физических основ телекоммуникаций СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. 8-913-980-60-71, e-mail: persp14@mail.ru.

Моргачев Юрий Вячеславович

инженер лаборатории физических основ телекоммуникаций СибГУТИ, e-mail: morgachev.yury@gmail.com.

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-910-433-27-89, e-mail: evgil45@mail.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана, тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

Флегонтов Виталий Иванович

к.э.н., доцент, доцент кафедры экономики и финансов Одинцовского филиала МГИМО МИД РФ (143007, Московская область, г. Одинцово, ул. Ново-Спортивная, д. 3), тел. (499) 263-68-46, e-mail: Fvi55@yandex.ru.

The critical bending radius of graphene antennas estimation

A. Cherevko, Yu. Morgachev, E. Il'in, A. Polubekhin, V. Flegontov

The parameter characterizing the applicability of flexible graphene antennas is defined. Relationship of graphene antenna material resistance to direct current is determined. The analysis was carried out on the basis of the experiment, computer modeling and monitoring of literature data.

Keywords: graphene antenna, printing technology, flexible antennas, eco-friendly electronics.