

МНЕМТ с предельной частотой усиления по мощности $f_{\max} = 0.63$ ТГц на основе наногетероструктуры $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{GaAs}$

© Д.В. Лаврухин[†], А.Э. Ячменев, Р.Р. Галиев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев,
Ю.В. Федоров, П.П. Мальцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

(Получена 10 апреля 2013 г. Принята к печати 16 апреля 2013 г.)

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии была выращена наногетероструктура $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$ со ступенчатым метаморфным буфером на подложке GaAs. Среднеквадратичное значение шероховатости поверхности составило 3.1 нм. На данной наногетероструктуре был изготовлен МНЕМТ транзистор с зигзагообразным затвором длиной 46 нм, для которого предельные частоты усиления по току и по мощности составили $f_T = 0.13$ ТГц и $f_{\max} = 0.63$ ТГц соответственно.

1. Введение

В настоящее время полевые транзисторы с затвором Шоттки на основе метаморфных МНЕМТ (*metamorphic high electron mobility transistor*) наногетероструктур на подложках GaAs являются наиболее перспективными для аналоговых устройств терагерцового диапазона частот [1]. При этом для создания МНЕМТ с высокими значениями предельных частот усиления по току f_T и мощности f_{\max} необходим продуманный дизайн как гетероструктуры, так и топологии транзистора.

Рекордные значения f_T и f_{\max} достигнуты на структурах с высоким (до $x = 0.8$) содержанием индия в канале $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [2–4]. В качестве примера в работе [5] приведен МНЕМТ с активным слоем в виде составной квантовой ямы (КЯ) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и длиной затвора $L_g = 50$ нм. При данной конструкции МНЕМТ предельные частоты составили: $f_T = 0.37$ ТГц и $f_{\max} = 0.67$ ТГц. Для увеличения частоты до значения $f_T = 0.66$ ТГц авторы [6] на структуре с одиночной КЯ $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ уменьшили L_g до 20 нм. В работе [4] за счет сложной топологии транзистора с затвором на высокой ножке и двухступенчатого травления рецесса получили $f_T = 0.69$ ТГц и $f_{\max} = 0.80$ ТГц при $L_g = 40$ нм, несмотря на уменьшение содержания индия в активном слое до 70%. Таким образом, рекордные характеристики МНЕМТ достигаются геометрией затвора транзистора в сочетании с дизайном наногетероструктуры, в частности конструкцией метаморфного буфера и канала.

С точки зрения физики гетероструктур при разработке дизайна МНЕМТ-наногетероструктуры необходимо уменьшить эффективную массу электронов в канале транзистора за счет увеличения мольной доли индия x в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В свою очередь это позволит увеличить подвижность электронов и их дрейфовую скорость насыщения [7,8,9]. Также необходимо приблизить КЯ к поверхности гетероструктуры, что позволит улучшить управляемость полевого транзистора (уменьшить короткоканальные эффекты) [4,10]. Однако при этом

нужно учитывать влияние поверхностного потенциала на зонный профиль гетероструктуры и использовать компенсирующее легирование для сохранения концентрации электронов в КЯ [11]. Оптимальной конструкцией метаморфного буфера (МБ) $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$, независимо от конечного содержания y (InAs), является МБ со ступенчатым законом изменения y и суммарной толщиной 1–1.2 мкм, как было показано в работе [12].

В обзоре [13], посвященном созданию твердотельных усилителей субмиллиметрового диапазона длин волн, показано, что МНЕМТ с рекордными рабочими частотами должен иметь длину затвора $L_g < 50$ нм. При этом для используемых в реальных топологиях транзисторов размерах затворы с подобной длиной подвержены механической неустойчивости — склонны к „заваливанию“. Существует несколько подходов к решению данной проблемы: создание субножки, опирающейся на подслоя диэлектрика [14]; формирование массива микроколон, поддерживающих „шляпу“ грибообразного затвора, и т.д. При формировании грибообразных затворов с помощью трехслойной системы резистов ПММА950К/ПМГИ/ПММА950К [15] за счет „профилирования центральной дозы“ (экспонировании краев ножки с меньшей дозой, чем центр) можно достигнуть $L_g \approx 50$ нм. Данная система электронных резистов весьма чувствительна к внешним факторам: рельефу поверхности наногетероструктур, размерам и геометрии периферийных контактных площадок, условиям проявления и толщине металла [15–17]. Из-за невозможности достичь устойчивого воспроизведения заданного значения L_g , данные факторы ограничивают практическое использование трехслойной системы резистов. Таким образом, для создания затворов с длиной менее 50 нм необходимо использовать более сложные системы резистов с продуманной формой „ножки“ затвора.

Цель настоящей работы состоит в создании МНЕМТ с длиной затвора L_g менее 50 нм и предельной частотой усиления по мощности f_{\max} более 0.6 ТГц на основе метаморфной наногетероструктуры $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$.

[†] E-mail: denis_lavruhin@mail.ru

δ -Si \rightarrow	n^+ (Si) $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$	15 nm	Contact layer
	$\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$	12 nm	Barrier layer
	$\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$	3 nm	Spacer
	$\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$	18 nm	Channel
	$\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$	400 nm	Barrier layer
	$\text{In}_{0.51}\text{Al}_{0.49}\text{As}$	200 nm	Metamorphic buffer
	$\text{In}_{0.41}\text{Al}_{0.59}\text{As}$	200 nm	
	$\text{In}_{0.31}\text{Al}_{0.69}\text{As}$	200 nm	
	$\text{In}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{As}$	200 nm	
	$\text{In}_{0.10}\text{Al}_{0.90}\text{As}$	200 nm	Buffer layer
	GaAs	300 nm	
		GaAs (100)	

Рис. 1. Схема эпитаксиальных слоев МНЕМТ наногетероструктуры.

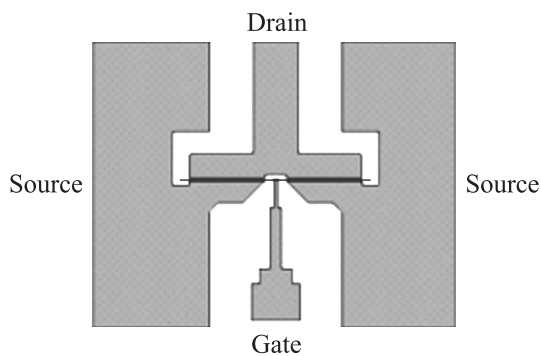


Рис. 2. Топология изготовленных МНЕМТ-транзисторов.

2. Образцы и методика измерений

МНЕМТ наногетероструктуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (100) на установке Riber 32P в ИСВЧПЭ РАН. Схематичное изображение эпитаксиальных слоев приведено на рис. 1. МНЕМТ наногетероструктура содержала ступенчатый МБ толщиной 1 мкм и каналный слой $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$. Температуры роста МБ и канала составили 380 и 470°C соответственно. Концентрации легирования кремнием в контактном n^+ - и δ -слоях составили $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Измерения электрофизических параметров: концентрации n_H и подвижности μ_H двумерного электронного газа в КЯ $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$ проводились с помощью эффекта Холла при температурах $T = 300$ и 77 К.

Морфология поверхности образца наногетероструктуры исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью сканирующего мультимикроскопа СММ-2000. По АСМ изображениям была рассчитана среднеквадратичная шероховатость поверхности RMS (root mean square).

Затворы формировались методом электронно-лучевой литографии на нанолитографе Raith 150 TWO с помощью пятислойной системы резистов ПММА950К/ПМГИ/ПММА950К/ПМГИ/ПММА950К. После экспонирования и проявления периферийной части затвора — „шляпы“ (в виде линии шириной 800 нм) была проэкспонирована его нижняя часть — „ножка“ затвора. Центральная часть „ножки“ формировалась однопиксельной зигзагообразной линией, при этом линейная доза варьировалась в пределах 600–1000 пКл/см. Для получения ступенчатого профиля проявления резист подвергался дополнительной зигзагообразной засветке шириной 200 нм при той же дозе.

Для измерения высокочастотных характеристик транзисторов: частоты усиления по току f_T и по мощности f_{max} были изготовлены МНЕМТ с шириной затвора 2×60 и 2×80 мкм и длиной затвора 46 нм. Топология тестовых транзисторов, полученная последовательным применением методов фотолитографии, травления и металлизации, приведена на рис. 2.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Электрофизические параметры МНЕМТ наногетероструктуры составляют $\mu_H = 7000$ и $22000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $T = 300$ и 77 К соответственно. Концентрация электронов для обеих температур $n_H = 3.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Измеренные значения μ_H показывают, что использование МБ с приращением каждой ступени по индию на 10% позволяет выращивать активную область с высоким структурным совершенством. Это связано с формированием инверсной ступени $\text{In}_{0.51}\text{Al}_{0.49}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$, которая устраняет остаточное механическое напряжение в структуре.

На рис. 3 приведено АСМ изображение с полем 9.5×9.5 мкм. Видно, что на поверхности МНЕМТ нано-

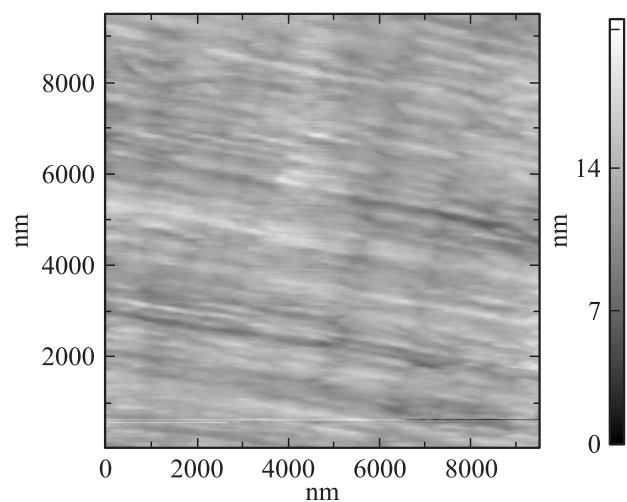


Рис. 3. АСМ изображение МНЕМТ наногетероструктуры (поле 9.5×9.5 мкм).

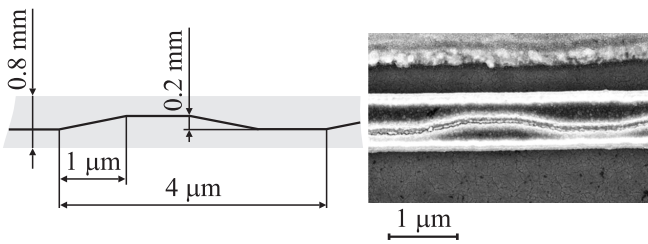


Рис. 4. Схема и микрофотография зигзагообразного затвора (вид сверху).

гетероструктуры присутствует характерный анизотропный поперечно-полосатый рельеф (*cross-hatch*). Среднеквадратичная шероховатость поверхности составила 3.1 нм, что хорошо согласуется с работами, посвященными метаморфным наногетероструктурам с содержанием индия в канале $\sim 42\%$ [18,19]. Полученное значение RMS является небольшим для метаморфных наногетероструктур. Однако на такой поверхности достаточно сложно сформировать наноразмерные элементы топологии, в частности изготовить механически устойчивый грибообразный затвор.

Разработка сложной пятислойной системы резистов ПММА950 К/ПМГИ/ПММА950 К/ПМГИ/ПММА950 К позволила решить эту проблему. Для надежного контроля размеров и формы „ножки“ затвора область формирования „ножки“ была разбита на ряд подслоев системы резистов ПММА950К/ПМГИ/ПММА950К, которые независимо проявлялись в проявителе МИБК:ИПС (1:1). Это дало возможность увеличить высоту „ножки“, что в свою очередь должно приводить к уменьшению паразитных емкостей. В нашем случае „ножка“ затвора имеет форму зигзага, поэтому механическая жесткость всего затвора увеличивается. Это достигается за счет увеличения эффективной площади, поддерживающей широкую „шляпу“, что дополнительно приводит к уменьшению коэффициента шума. Сам зигзаг имел размах 200 нм с периодом 4000 нм. Суммарная толщина „шляпы“ составила 800 нм. На рис. 4 показана схема и микрофотография (вид сверху) разработанного зигзагообразного затвора.

На микрофотографии хорошо видна зигзагообразная впадина, соответствующая „ножке“ затвора. Отметим, что сама система формирования такого затвора отличается от прямого затвора только геометрией экспонируемой „ножки“. Кроме того, зигзагообразная форма не оказывает влияния на СВЧ-параметры транзисторов, так как вариация геометрии затвора много меньше длины волны в рабочем частотном диапазоне и сравнима с эффективной областью полевого управления каналом под затвором транзистора. На рис. 5 приведены изображения растрового электронного микроскопа (РЭМ) разработанных зигзагообразных затворов.

Измерения S -параметров тестовых транзисторов проводились в схеме с общим истоком в диапазоне частот 0.1–67 ТГц. При помощи парных трехконтактных зондовых головок векторный анализатор Agilent E8361A

подключался к МНЕМТ непосредственно на пластине. Результаты измерений частотных характеристик изготовленных транзисторов с длиной затвора $L_g = 46$ нм и ширинами затвора $W_g = 2 \times 60$ и 2×80 мкм приведены на рис. 6. Измерения проводились для транзисторов, расположенных в одном и том же рабочем модуле на пластине. Напряжение между истоком и стоком U_{DS} составляло +1.5 В, а напряжение между истоком и затвором $U_{GS} = -0.8$ В. Наибольшие предельные частоты усиления по току и по мощности были получены для МНЕМТ с шириной затвора $W_g = 2 \times 80$ мкм и составили $f_T = 0.13$ ТГц и $f_{\max} = 0.63$ ТГц соответственно.

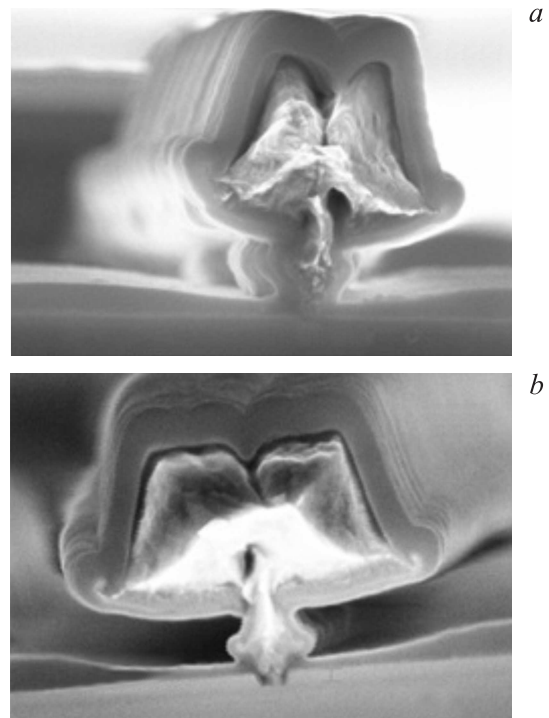


Рис. 5. РЭМ изображения зигзагообразных затворов с $L_g = 46$ нм с шириной затвора 2×60 и 2×80 мкм.

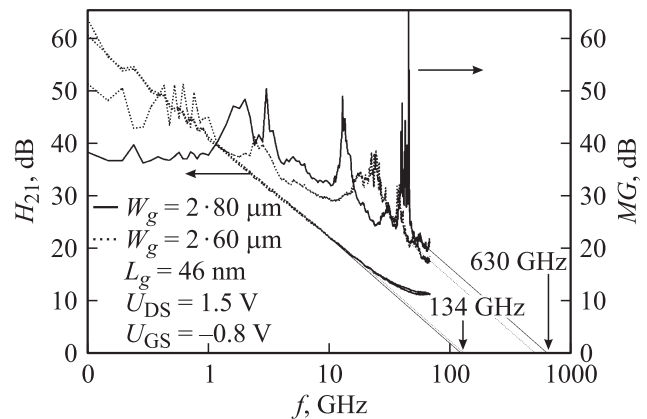


Рис. 6. Зависимости $|H_{21}|$ и MasonsGain (MG) для МНЕМТ-транзисторов с $W_g = 2 \times 60$ (пунктирная линия) и 2×80 мкм (сплошная линия) и $L_g = 46$ нм.

4. Заключение

В работе изготовлен МНЕМТ-транзистор на основе метаморфной наногетероструктуры $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs. Использование ступенчатого МБ позволило достичь высокого структурного совершенства поверхности образца ($\text{RMS} = 3.1$ нм). С помощью электронно-лучевой нанолитографии на пятислойной системе резистов получен зигзагообразный затвор с длиной 46 нм. Предельные частоты усиления по току и по мощности получены для МНЕМТ-транзистора с шириной затвора $W_g = 2 \times 80$ мкм и составляют $f_T = 0.13$ ТГц и $f_{\text{max}} = 0.63$ ТГц соответственно.

Данная работа выполнена в рамках федеральной целевой программы „Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники“ на 2008–2015 годы (мероприятие 68 и 132) — I очередь, по государственному контракту № 16.426.11.0051 от 28 апреля 2012 г.

Список литературы

- [1] G.I. Ng, K. Radhakrishnan, H. Wang. *Proc. 13th Int. GaAs Symp.* (Paris, France, 2005) p. 13.
- [2] D. Kim, J. Alamo, P. Chen, W. Ha, M. Urteaga, B. Brar. *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meet.* (2010) p. 30.6.1.
- [3] J.A. del Alamo. *Nature*, **479**, 317 (2011).
- [4] D.-H. Kim, B. Brar, J.A. del Alamo. *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting* (Washington, DC, 2011).
- [5] A. Leuther, A. Tessmann, H. Massler, R. Aidam, M. Schlechtweg, O. Ambacher. *Proc. 24th Int. Conf. Indium Phosphide and Relat. Mater.* (2012).
- [6] A. Leuther, S. Koch, A. Tessmann, I. Kallfass, T. Merkle, H. Massler, R. Loesch, M. Schlechtweg, S. Saito, O. Ambacher. *Proc. 23rd Int. Conf. Indium Phosphide Relat. Mater.* (Berlin, Germany, 2011).
- [7] M.-S. Son, B.-H. Lee, M.-R. Kim, S.-D. Kim, J.-K. Rhee. *J. Kor. Phys. Soc.*, **44** (2), 408 (2004).
- [8] А. Шиленас, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Е.А. Климов. *ФТП*, **47** (3), 348 (2013).
- [9] K. Požela, A. Šilėnas, J. Požela, V. Jucienė, G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov. *Appl. Phys. A*, **109**, 233 (2012).
- [10] G.H. Jessen, R.C. Fitch, J.K. Gillespie, G. Via, A. Crespo, D. Langley, D. J. Denninghoff, M. Trejo, E.R. Heller. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **54** (10), 2589 (2007).
- [11] Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзева. *ФТП*, **45** (5), 666 (2011).
- [12] S.S. Pushkarev, G.B. Galiev, E.A. Klimov, D.V. Lavrukhin, I.S. Vasil'evskii, R.M. Imamov, I.A. Subbotin, O.M. Zhigalina, V.G. Zhigalina, P.A. Buffat, B. Dwir, E.I. Suvorova. *Proc. Int. Conf. Micro- and Nanoelectron.* (Moscow–Zvenigorod, Russia, 2012) v. 1, p. 3.
- [13] Lorene A. Samoska. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Techn.*, **1** (1), 9 (2011).
- [14] Dae-Hyun Kim, Suk-Jin Kim, Jae-Hak Lee, Ki-Woong Chung, Kwang-Seok Seo. *Proc. of GaAs ManTech Digests* (2004).
- [15] E.V. Anichenko, E.V. Erofeev, S.V. Ishutkin, V.A. Kagadei, K.S. Nosaeva. *Proc. Int. Conf. Microwave and telecommunication technology* (Tomsk, Russia, 2010) p. 754.
- [16] B. Hadad, I. Toledo, G. Bunin, J. Kaplun, M. Leibovitch, Y. Shapira, Y. Knafo. *Proc. of GaAs ManTech Digests* (2004).
- [17] Huang-Ming Lee, Edward Yi Chang, Szu-Hung Chen, Chun-Yen Chang. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, L1508 (2002).
- [18] Z. Jiang, W. Wang, H. Gao, L. Liu, H. Chen, J. Zhou. *Appl. Sur. Sci.*, **254**, 5241 (2008).
- [19] I. Tangring, S.M. Wang, M. Sadeghi, Q.F. Gu, A. Larsson. *J. Cryst. Growth.*, **281**, 220 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

MHEMT with power frequency up to $f_{\text{max}} = 0.63$ THz based on $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{GaAs}$ nanoheterostructure

D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, R.R. Galiev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, Yu.V. Fedorov, P.P. Maltsev

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

Abstract $\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}/\text{In}_{0.42}\text{Al}_{0.58}\text{As}$ nanoheterostructure with step-graded buffer was grown by molecular-beam epitaxy on GaAs wafer. The root mean square roughness was 3.1 nm. MHEMT with 46 nm-gate length was fabricated on the base of given nanoheterostructure. The cut off frequency and the power gain frequency were $f_T = 0.13$ THz and $f_{\text{max}} = 0.63$ THz.