

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Моделирование замедляющих систем приборов терагерцового диапазона
частот**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2211 группы
направления 03.04.01
Института физики
Чинарова Сергея Алексеевича

Научный руководитель
доцент кафедры
электроники, колебаний и волн,
к.ф.-м.н.

 31.05.23

Титов А.В.

Зав. кафедрой нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент



Бегинин Е.Н.

Саратов, 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из тенденций развития современной радиоэлектроники является освоение терагерцового частотного диапазона, занимающего промежуточное положение между хорошо изученными микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитного излучения. В последние годы резко возросло количество фундаментальных и прикладных исследований по этой тематике.

Терагерцовым (ТГц) излучением называется электромагнитное излучение в интервале частот от 0,3 до 10 ТГц и диапазоном длин волн от 1 мм до 30 мкм. Этот частотный интервал занимает важную на практике часть электромагнитного спектра между инфракрасным (ИК) и микроволновым диапазонами, поэтому его также часто называют дальним ИК или субмиллиметровым диапазоном. Несмотря на существенный прогресс в области генерации и приёма ТГц-излучения, данное направление исследований остаётся одним из быстро развивающихся в современной прикладной физике. Многочисленные задачи, стоящие перед исследователями в этой области, ещё не решены. К ним относится всё ещё невысокая, порядка 0,1%, эффективность оптико-терагерцового преобразования, сложность установок и др.

В ТГц диапазоне частот прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы. Поэтому ТГц излучение можно использовать для неразрушающего контроля материалов, например, при сканировании багажа или контроле качества продуктов питания и медикаментов.

В данной работе рассмотрены замедляющие системы (ЗС) для широкополосных ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов, позволяющие получать усилители в этих диапазонах с приемлемыми параметрами.

Целью данной магистерской работы является обзор работ, посвященных лампам бегущей волны коротковолновой области СВЧ диапазона, разработка масштабируемого макета замедляющей системы ЛБВ для расчета электродинамических характеристик в терагерцовом диапазоне частот в Ansys HFSS, а также расчет электродинамических характеристик замедляющей системы на основе разработанного макета

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Список литературы включает 18 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. В первой главе приведены сведения о ТГц-излучении, а также проведен обзор работ, посвященных данной теме.

На данный момент в СВЧ электронике активно разрабатываются и изучаются методы генерации и усиления электромагнитного излучения субмиллиметрового (терагерцового) диапазона частот. Этот диапазон располагается между коротковолновой областью СВЧ диапазона и длинноволновой областью оптического диапазона.

Терагерцовое излучение представляет большой интерес для изучения учёными из разных стран. До недавнего времени большая часть ТГц-спектра не использовалась, поскольку отсутствовали как источники, так и приёмники когерентного излучения этого диапазона.

Актуальность исследований в данной области обоснована широкими возможностями применения терагерцового излучения в материаловедении, биологии, медицине и системах обеспечения защищенности, а также для изучения быстропротекающих процессов способами нестационарной спектроскопии. Важным условием развития данного направления является разработка и создание систем терагерцовой спектроскопии с высочайшей эффективностью генерации и регистрации ТГц излучения. Важный прорыв в разработке терагерцовых систем произошёл в конце 80-х годов в связи с появлением мощных пико- и фемтосекундных титан-сапфировых лазеров. Они позволили создать системы широкополосной терагерцовой спектроскопии, базирующиеся на преобразовании оптических (~800 нм) импульсов в терагерцовые.

В 2001 г. Кси-Ченг Жангом для терагерцового излучения (ТГцИ) введен в употребление термин «Т-лучи» [1]. Ранее такое излучение называлось субмиллиметровым, а до этого инфракрасным. Интерес к терагерцовому излучению обусловлен рядом его свойств [2, 3].

Кроме того, разработка эффективных наружных ТГц-систем для современных коммуникационных и считывающих устройств представляет собой более сложную задачу. Главное препятствие - атмосфера. Атмосфера в некоторой степени поглощает миллиметровое и ТГц-излучение. На самом деле, поглощение по большей степени возникает из-за различных газов, которые образуют атмосферный воздух (Рис. 1). Он оказывает сильное и переменчивое воздействие из-за наличия значительных изменений содержания водяного пара, которые происходят из-за естественных погодных условий. Затухание атмосферы возрастает по мере повышения рабочей частоты. Поэтому поглощение атмосферы характеризуется ослаблением атмосферы, которое возрастает с 4 дБ/км до 500 дБ/км для диапазона частот от 0,1 ТГц до 1 ТГц. Самый низкий показатель близ общепринятых атмосферных окон - 0,14, 0,22, 0,34, 0,65, 0,85 ТГц [4]. Исходя из прогресса MVED, рядом с этими действующими "окнами" происходит построение эксплуатационной инфраструктуры систем ТГц.

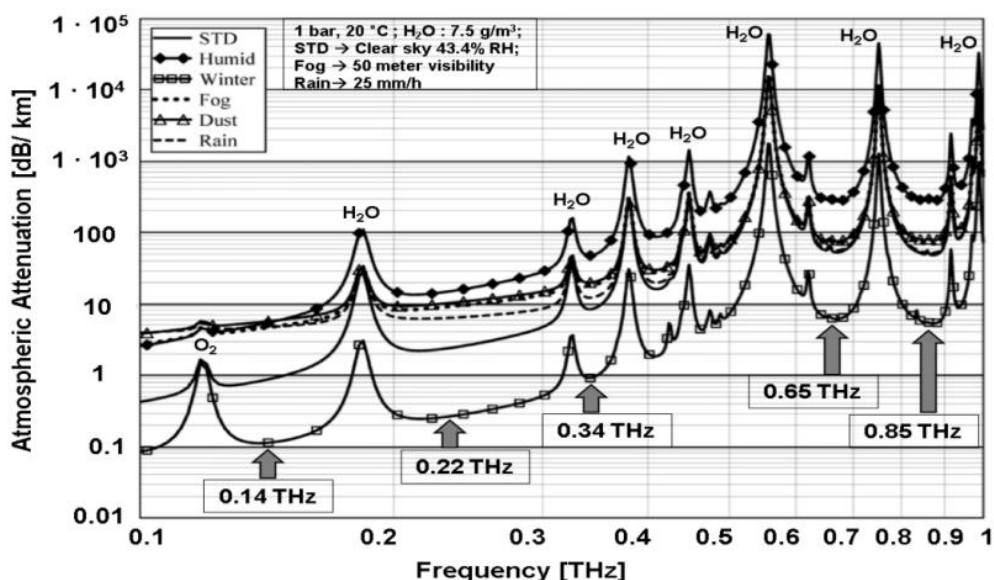


Рис. 1. График затухания атмосферы в сравнении с частотным графиком с охарактеризованными универсальными окнами [4]

В настоящее время вакуумные и полупроводниковые СВЧ усилители и генераторы используются в таких областях как спутниковая связь, радиолокация и медицина [5]. Важным аспектом текущих исследований

является миниатюризация и простота изготовления вакуумных электронных устройств, что может снизить стоимость устройства. Новые области применения, такие как высокоскоростная связь, радиолокация с повышенным разрешением и активная визуализация в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, требуют наличия компактных мощных источников за пределами W-диапазона, что станет основной движущей силой для исследований вакуумной электроники в ближайшее время [6].

В частности, вакуумная электроника может играть фундаментальную роль в мобильной связи 5G, поскольку твердотельные устройства не могут обеспечить достаточную мощность передачи на частотах миллиметрового диапазона. Фактически архитектура 5G будет также основана на сети беспроводного доступа (WAN) в миллиметровом диапазоне волн (30–300 ГГц), [7]. Лампы бегущей волны (ЛБВ) могли бы стать идеальным решением для обеспечения беспроводной связи на больших расстояниях с высокой скоростью передачи данных [8]. Также в Главе 1 рассмотрена перспективная замедляющая система [9], которая легла в основу расчета.

В Главе 2 представлены краткие сведения о принципе работы лампы бегущей волны, а также о платформе ANSYS High Frequency Structure Simulator (HFSS). ANSYS Electronics Desktop – это комплексная платформа, которая позволяет инженерам-электротехникам проектировать и моделировать различные электрические, электронные и электромагнитные компоненты, устройства и системы [10]. В едином интерфейсе ANSYS Electronics Desktop пользователи могут создавать виртуальные электромагнитные и тепловые модели будущих устройств, устанавливать связи между междисциплинарными проектами, разрабатывать модели системного уровня. В рамках рабочего места доступны все передовые расчётные модули, таким как ANSYS HFSS, ANSYS Maxwell, ANSYS Q3D Extractor и ANSYS IcePak с использованием электрических (ECAD) и механических CAD (MCAD) геометрических моделей. Кроме того, проект,

созданный в ANSYS Electronics Desktop может быть импортирован в среду ANSYS Workbench для проведения междисциплинарных расчётов с механическими, гидрогазодинамическим решателями. Рабочее место в рамках одного интерфейса позволяет работать 2D/3D конечно элементным моделям и симуляторам цепей в режиме ко-симуляции.

В Главе 3 приведены результаты моделирования замедляющей системы для ЛБВ в пакете Ansys HFSS. На основе статьи, приведенной в первой главе, была построена планарная замедляющая система для лампы бегущей волны на основе платформы ANSYS Electronics Desktop и проведен анализ характеристик данной системы с целью проверки ее пригодности для использования в ЛБВ терагерцового диапазона.

Основным преимуществом планарной структуры является ее относительно простая реализация по сравнению с классическими трехмерными замедляющими системами. Планарная структура может быть реализована с использованием стандартных методов фотолитографии.

В качестве основы ЗС взят крестообразный волновод. В данной задаче проводится анализ на собственные моды, поэтому построенная модель представляет собой один период замедляющей системы (Рис. 2). В канал добавлены две алмазные подложки, на каждую из которых нанесена планарная металлическая замедляющая система типа меандр (Рис. 3). Важно отметить, что нанесенные на подложки замедляющие системы идентичны, но при этом имеют смещение на полпериода относительно друг друга (Рис. 4)

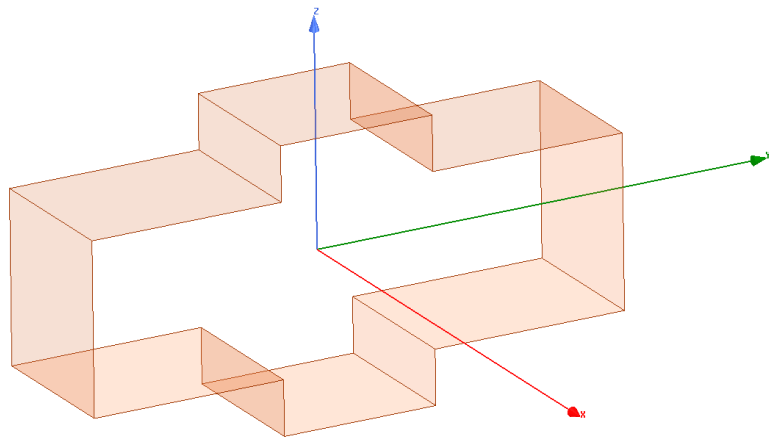


Рис. 2. Общий вид крестообразного волновода

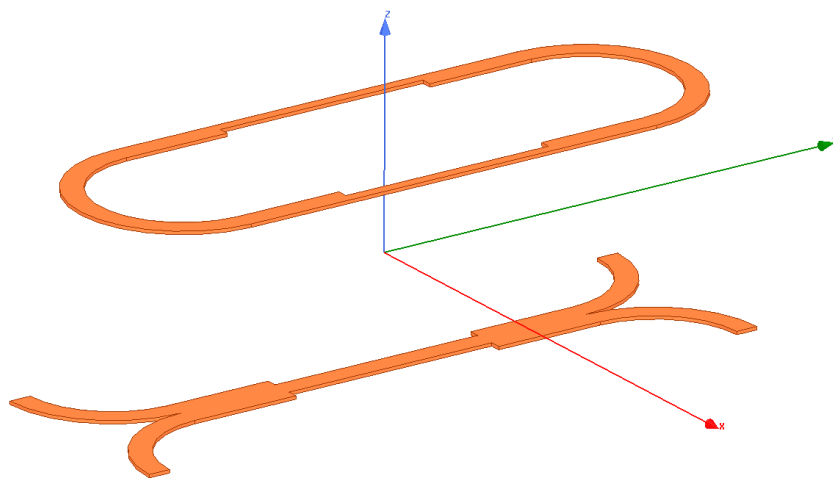


Рис. 3 Конструкция меандра

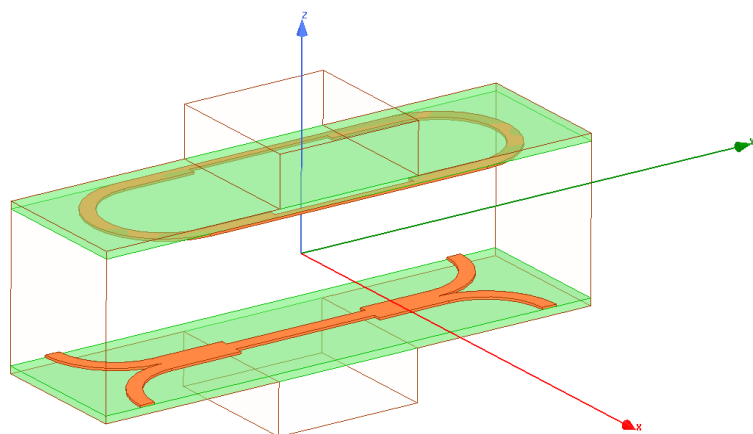


Рис. 4 Общий вид планарной замедляющей системы

Произведены расчеты для систем миллиметрового и

субмиллиметрового диапазона. В первом случае за основу была взята модель непосредственно из работы [9]. В этом случае радиус кривизны петли меандра r составляет 0.1 мм. Ниже приведен пример полученной дисперсионной диаграммы для первой моды.

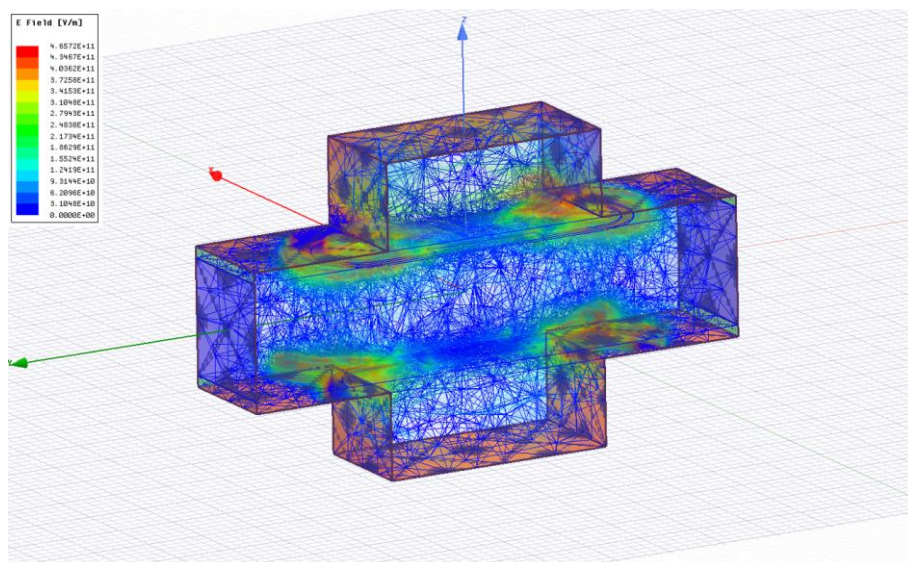


Рис. 5 Распределение полей в структуре и расчетная сетка

Как видно из Рис. 6 для данной модели первая мода может возбуждаться в диапазоне до 110 ГГц. Очевидно, что для работы на повышенных частотах следует либо использовать высшие моды, либо уменьшать масштаб замедляющей структуры.

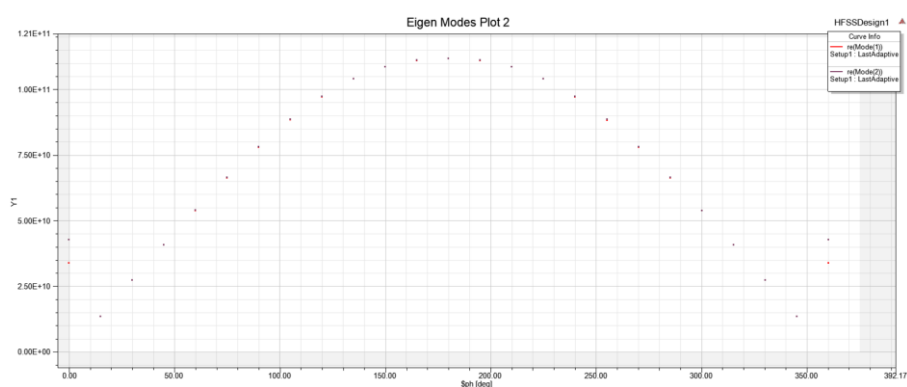


Рис. 6. Дисперсионная характеристика для первой моды при $r=0.1$ мм.

В случае уменьшения масштаба замедляющей системы дисперсионная характеристика также видоизменяется, что очевидно, со смещением в область более высоких частот. На Рис. 7 приведен пример

дисперсионной характеристики, на которой первая мода лежит в диапазоне до 800 ГГц. Это соответствует случаю десятикратному уменьшению масштаба.

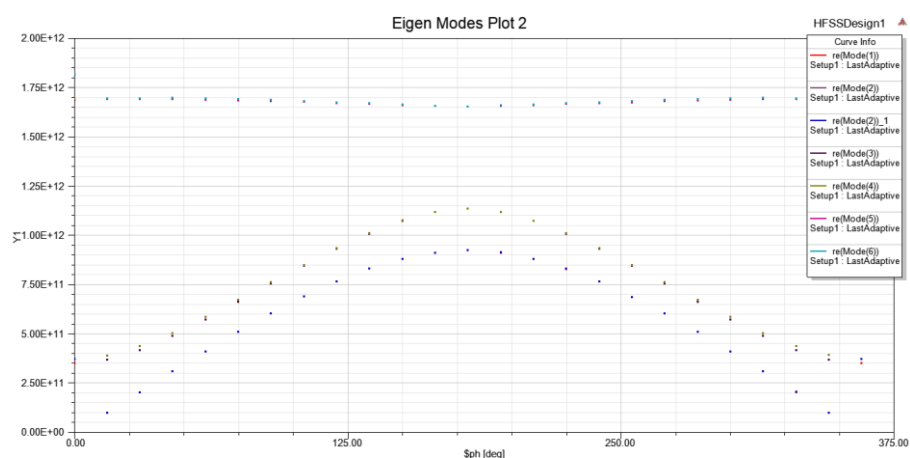


Рис. 7 Дисперсионная характеристика для первой моды при $r=0.01$ мм.

Также в рамках построенного макета возможно получить распределение высших мод, однако это потребует больших вычислительных ресурсов (Рис. 8).

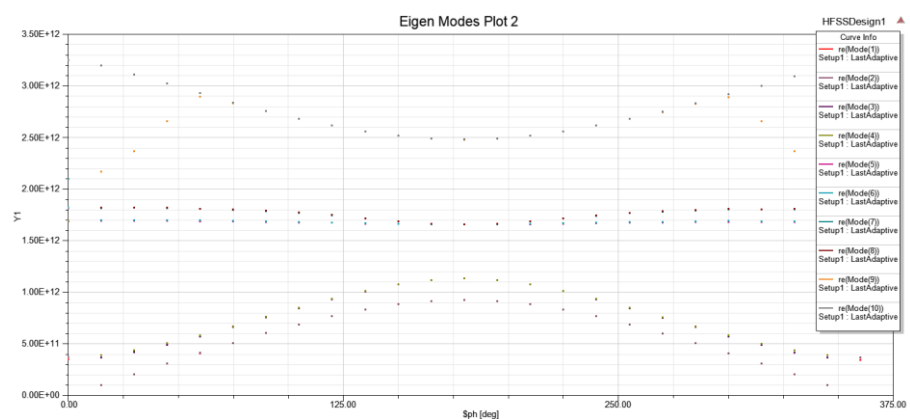


Рис. 8 Дисперсионная характеристика с увеличенным количеством собственных мод при $r=0.01$ мм.

Таким образом с помощью разработанного макета возможен расчет дисперсионных характеристик замедляющей структуры указанного типа с возможностью быстрой, в случае необходимости, перестройкой геометрии.

Заключение

Рассмотрены современное состояние разработок и проанализированы тенденции развития ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов частот. Отмечено, что из-за малых размеров замедляющих структур стремительно снижается эффективность взаимодействия и уровень выходной мощности. Показано, что продвижение в коротковолновую часть миллиметрового диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных конструкций основных ее узлов, и в первую очередь замедляющей системы.

Рассмотрены основные функциональные возможности, освоена платформа ANSYS Electronics Desktop и проведен анализ характеристик планарной замедляющей системы для лампы бегущей волны.

Разработан масштабируемый макет замедляющей системы лампы бегущей волны для расчета электродинамических характеристик в терагерцовом диапазоне частот в Ansys HFSS. Рассчитаны электродинамические характеристики замедляющей системы на основе разработанного макета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 – Д.Р. Хохлов. Т-лучи: физика и возможности применения [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05\(108\)-2014/20654](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05(108)-2014/20654)
- 2 – Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. // УФН. 2011. Т. 181. С. 867.
- 3 – Электромагнитные волны терагерцового диапазона. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 29. Отчет за 2005 г.
- 4 – Roger Appleby and and H Bruce Wallace, Standoff Detection of Weapons and Contraband in the 100 GHz to 1 THz Region, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2007, 55 (11), 2944-2956.
- 5 – J. Qiu, B. Levush, J. Pasour, A. Katz, C. Armstrong, D. Whaley, J. Tucek, K. Kreischer and D. Gallagher, "Vacuum tube amplifiers", IEEE Microwave Magazine, vol. 10, no. 7, pp. 38-51, 2009. DOI: 10.1109/MMM.2009.934517
- 6 – C. Paoloni, R. Letizia, R. Zimmerman, F. Andr, S. Kohler, V. Krozer, G. Ulisse, F. Magne, A. Ramirez, M. Rocchi, M. Marilier, and R. Vilar, Wband twts for new generation high capacity wireless networks, 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 2016, pp. 1– 2. DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561865
- 7 – S. E. Alavi, M. R. K. Soltanian, I. S. Amiri, M. Khalily, A. S. M. Supa'at, H. Ahmad, "Towards 5G: A Photonic Based Millimeter Wave Signal Generation for Applying in 5G Access Fronthaul", Nature, Scientific Reports, 6:19891, 2016. DOI: 10.1038/srep19891
- 8 – C. Paoloni, F. Magne, F. Andre, V. Krozer, R. Letizia, M. Marilier, A. Ramirez, M. Rocchi, R. Vilar and R. Zimmerman, "Millimeter wave wireless system based on point to multipoint transmissions", 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), 2016. DOI: 10.1109/EuCNC.2016.7561014.
- 9 – G. Ulisse, V. Krozer, Senior Member, IEEE "W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure " 0741-3106 (c) 2016 IEEE.
- 10 – HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Agilent, 2000.