Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика

Секция «Электроника»

Председатель доктор технических наук, профессор Сергей Владимирович Оболенский

Заседание секции проводилось 17 мая 2016 г. Председатель – С.В. Оболенкский, секретарь – Е.А. Тарасова. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕРАГЕРЦОВЫХ ДИОДАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТОК

Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, В.А. Козлов, Д.Г. Павельев

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время происходит интенсивное развитие полупроводниковых генераторов терагерцового (ТГц) диапазона частот. Часто в таких источниках используются генераторы эталонных частот микроволнового диапазона (10...100 ГГц). Это позволяет стабилизировать частоту ТГц излучения с высокой точностью, определяемой точностью эталонного генератора. Такое продвижение оказалось возможным благодаря созданию гармонических смесителей, умножителей и детекторов для ТГц диапазона на основе диодов, использующих сверхрешетки (СР). Такие диоды обладают вольт-амперной характеристикой с отрицательной дифференциальной проводимостью вплоть до частот выше 1 ТГц. Ранее сотрудниками кафедры электроники уже были исследованы характеристики в таких диодах. Применялись СР с 18, 30 и 100 периодами [1, 2]. Мы предположили, что 6-ти периодные СР перспективнее, по сравнению с 18-ти периодными.

Таким образом, целью работы являлось изучение транспорта электронов в 6-ти периодных СР путем моделирования методом Монте-Карло и выявление возможности увеличения рабочих частот приборов на сверхрешетках путем оптимизации их параметров.

С помощью модели Кронига-Пенни была получена зависимость уровней энергии в планарных структурах на основе сверхрешеток от различного количества монослоев AlAs (от 2 до 6) при фиксированных 18 монослоях GaAs. Эти данные затем использовались при вычислениях методом Монте-Карло.

Таблица.

транспорта электронов сверхрешетке использовался одночастичный метод Монте-Особое Карло. внимание обращалось на определение квазибаллистических лоли электронов электронов, И претерпевших существенное изменение траектории движения за счет рассеяния на оптических фононах (результаты в таблице).

Для детального расчета

	Гаолица.					
	Напряженность поля, кВ/см					
			8	12	20	
штук	2 кВ/см		кВ/см	кВ/см	кВ/см	
Количество рассеяний на оптических фононах	0	5	3	2	0	
	1-2	22	15	9	6	
	3-5	19	12	10	10	
	5-10	6	7	8	9	
	больше 10	0	1	0	0	
	отражение	48	62	71	75	

С увеличением напряженности поля кол-во баллистических электронов снижается, а затем пропадает и заменяется переколебаниями (блоховскими осцилляциями).

Также из таблицы, следует, что примесное рассеяние слабо сказывается на скорости электронов в сверхрешетках с малым числом периодов. Это важно для

проведения оптимизации конструкции СР, так как паразитное сопротивление СР сказывается на эффективности ее работы.

На рисунке представлены результаты расчетов для средней скорости электронов от координаты. Положение середины минизоны варьировалось и осуществлялась калибровка модели по экспериментальным данным. Таким образом компенсировалась погрешность расчетов по модели Кронига-Пенни.

был получено, Также что полная средняя энергия электронов в 1.5...2 раза больше, чем поперечная, что свидетельствует о баллистическом характере движения электронов, т.е. что они летят вдоль оси в рабочей области CP.

Минимальное время пролета электронов через сверхрешетку 80 фс, что дает предельную частоту 10...12 ТГц.



Было проведено сравнение экспериментальной и расчетной вольт-амперных характеристик. Получено хорошее совпадение теории И эксперимента. Изготовленные диодные структуры исследовались в гармонических смесителях [3, 4]. Было показано что в диапазоне частот 0.2-5.3 ТГц они стабильно функционируют, так что можно предположить, что предельные частоты выше. Теоретические расчеты основе приближения Монте-Карло, квазигидродинамической модели на И аналитических оценок показывают, что предельные частоты 8-12 ТГц.

Изложенный в работе подход к анализу физических процессов транспорта электронов методом Монте-Карло позволяет проводить анализ деталей процессов переноса носителей заряда в коротких сверхрешетках, что важно для проведения оптимизации перспективных приборов. Предложенные методы калибровки модели по данным экспериментальных исследований крайне важны для последующих работ, так как позволяют проводить не только качественные, но и количественные расчеты. Оптимизация СР должна проводиться комплексно с учетом варьирования количества периодов СР, ее уровня легирования, положения и ширины минизоны, определяемой количеством монослоев GaAs и AlAs.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания (проект 2183, задание № 2014/134).

- [1] Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С., Панин А.Н., Вакс В.Л., Гавриленко В.И., Антонов А.В., Устинов В.М., Жуков А.Е. // ФТП. 2012. Т.46, вып.1. С. 125.
- [2] Павельев Д.Г., Демарина Н.В., Кошуринов Ю.И., Васильев А.П., Семенова Е.С., Жуков А.Е., Устинов В.М. // ФТП. 2004. Т.38, вып.9. С.1141.
- [3] Павельев Д.Г., Васильев А.П., Козлов В.А., Кошуринов Ю.И., Оболенская Е.С., Оболенский С.В., Устинов В.М. // Журнал радиоэлектроники. 2016. №1. С.1.
- [4] Pavelyev D.G., Skryl A.S., Bakunov M.I. // Opt. Lett. 2014. V.39, №19. P. 5669.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДА И ТРАНЗИСТОРА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ СИМВОЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ

А.Е. Китаев

АО «СКБ РИАП»

Известно, что при больших прямых токах в реальных полупроводниковых диодах наблюдаются отклонения от формулы Шокли. Ток диода может неявным образом выражаться через напряжение с помощью формулы [1]

$$I = I_s \left(e^{\frac{U - IR}{\varphi - \varphi}} - 1 \right). \tag{1}$$

Здесь I_s – это ток насыщения, R – омическое сопротивление области диода с меньшей концентрацией примесей (базы) [1], φ - температурный потенциал. Можно легко получить явное выражение для напряжения:

$$U = \varphi \ln(\frac{I}{I_s} + 1) + IR .$$
⁽²⁾

Обозначим обратную функцию, явным образом выражающую ток диода через напряжение, как "*Dinv*" (Diode inverse function). Начиная с 80-х годов 20-го века в системах символьной математики применяется так называемая функция Ламберта (W(x)) [2], в программном пакете "Mathematica" ее обозначают как ProductLog. Решая уравнение (1) относительно *I*, можно получить следующее выражение для тока:

$$I = Dinv(U) = -I_s + \frac{\varphi}{R}W(e^{\frac{U}{\varphi}}I_s\frac{R}{\varphi}e^{I_s\frac{R}{\varphi}}).$$
⁽³⁾

Здесь W(x) — это функция Ламберта. Используя ее предельное выражение для большого положительного аргумента, можно получить асимптотическую формулу для тока через диод (при больших прямых напряжениях):

$$I \approx \frac{U}{R} + \frac{\varphi}{R} \ln(I_s \frac{R}{\varphi}) .$$
⁽⁴⁾

Поворачивая характеристику диода на 180 градусов в плоскости *I,U* и сдвигая ее вдоль асимптотической прямой (4), можно сконструировать выражение для коллекторного тока транзистора (выраженного через напряжения коллектор-база и база-эмиттер):

$$I_{c} = \alpha Dinv(U_{be}) - Dinv(\alpha RDinv(U_{be}) - U_{cb}).$$
⁽⁵⁾

Здесь α – коэффициент передачи коллекторного тока [3]. Функция *Dinv* более полно раскрывается выражением (3). Аналогичное выражение можно составить и для эмиттерного тока:

$$I_e = -\alpha Dinv(-U_{cb}) + Dinv(\alpha RDinv(-U_{cb}) + U_{be}).$$
⁽⁶⁾

Мы здесь для простоты полагаем, что коэффициенты α и *R* одинаковы для обоих транзисторных переходов. Фактически выражения (5) и (6) обобщают известные транзисторные формулы Эберса-Молла [3].

Применяя уравнение Кирхгофа к коллекторной цепи усилителя с общим эмиттером (при возможном наличии дополнительного стабилизирующего резистора R_{ne} , включенного последовательно с эмиттером), можно получить следующее уравнение, связывающее напряжения коллектор-база и база-эмиттер:

$$\frac{E - U_{cb} - U_{be}}{R_{nc} + \frac{R_{ne}}{\alpha}} = \alpha Dinv(U_{be}) - Dinv(\alpha RDinv(U_{be}) - U_{cb}).$$
(7)

Здесь E - ЭДС источника питания, R_{nc} – сопротивление нагрузки, включенное последовательно с коллектором, а R_{ne} - стабилизирующее сопротивление, включенное последовательно с эмиттером. При выводе выражения (7) учтено также соотношение $I_c = \alpha I_e$, имеющее место для рабочих режимов транзистора. Решив уравнение (7) численно (например с помощью пакета "Mathematica"), можно получить функцию, связывающую напряжение коллектор-эмиттер ($U_{ce}=U_{cb}+U_{be}$) со входным напряжением база-эмиттер. Эта функция зависит не только от самого транзистора, но и от параметров внешней по отношению к транзистору выходной цепи. Отметим, что, зная подобную функцию (обозначим ее $F(U_{be})$), мы можем составить уравнение для нахождения состояний равновесия симметричного триггера:

$$U_{be} = F(F(U_{be})). \tag{8}$$

Уравнение (7) применимо и для расчета режима насыщения, но в этом случае мы должны считать U_{be} в левой части уравнения (7) функцией (см. формулу (2)) эмиттерного тока, который пропорционален коллекторному (в свою очередь зависящему от U_{cb} и U_{be}).

- [1] Битюрин Ю.А., Оболенский С.В., Мельников А.С., Чириманов А.П., Демарина Н.В., Киселева Е.В., Шитвов А.П./Измерение статических характеристик полупроводникового диода - Н.Новгород: ННГУ, 2004.
- [2] Сергеев С. А., Спиридонов Ф. Ф. Применение функции Ламберта W в решении задачи теплопроводности // Горизонты образования. 2002, - № 4. http://edu.secna.ru. - 5 с.
- [3] Степаненко И.П./ Основы теории транзисторов и транзисторных схем -М.: Энергия, 1977.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО 3-ММ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОТРОНА С МУЛЬТИМЕГАВАТТНЫМ УРОВНЕМ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ

Э.Б. Абубакиров¹⁾, Г.Г. Денисов²⁾, Ю.М. Гузнов¹⁾, В.Е. Запевалов¹⁾, С.А. Запевалов¹⁾, Н.А. Завольский¹⁾, А.Н. Леонтьев¹⁾, О.П. Планкин¹⁾, Р.М. Розенталь¹⁾, А.С. Седов¹⁾, Е.С. Семенов¹⁾

Институт прикладной физики РАН
 ²⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Мощные источники миллиметрового диапазона длин волн представляют значительный интерес для ряда приложений, таких как нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, системы питания линейных ускорителей заряженных частиц со сверхвысоким темпом ускорения и перспективные схемы радиолокации. Практически единственными кандидатами на генерацию интенсивного излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона являются гирорезонансные приборы на релятивистских электронных пучках.

В рамках программы по созданию нового поколения сверхмощных гироприборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона в Институте Прикладной Физики РАН был разработан и реализован на базе электронного ускорителя «Сатурн-Ф» [1] импульсный релятивистский гиротрон с длиной волны 3 мм, экспериментальному исследованию которого посвящена настоящая работа.

Предшествующий опыт подтвердил возможность создания релятивистских гиротронов на частотах 9.2 и 30 ГГц с рекордными значениями уровня мощности (~ 10 МВт) и КПД (~ 50%) [2,3]. Однако задача дальнейшего уменьшения длины волны является новой и представляет значительный интерес.

Фотография установки в ее текущем виде представлена на рис.1, основные проектные параметры гиротрона представлены в табл. 1.



Рис. 1.

	Табл.1	
Ускоряющее напряжение	250 кВ	
Напряжение анод-катод	130 кВ	
Ток пучка	80-120A	
Питч-фактор	1.3	
Длительность импульса	0.5-1 мкс	
Рабочая частота	94.4 ГГц	
Рабочая мода	TE _{12.5}	
Оптимум магнитного поля	4,58 Тл	
Максимум электронного КПД	37%	
Выходная мощность	5-10МВт	

Первые испытания показали наличие устойчивых режимов работы с частотой 94,5 ГГц и

выходной мощностью до 4,5 МВт. Характерная осциллограмма с параметрами U=228кВ, I=125А, $f_{zen}=94.461$ ГГц, $P_{out}=4,4$ МВт, $\eta=15,4\%$ показана на рис. 2. (Здесь

кривая 1 – осциллограмма ускоряющего напряжения, кривая 2 – осциллограмма тока коллекторного шунта и кривая 3 – огибающая микроволнового импульса; временной масштаб 0,5 мкс/дел).



Использование катушки подмагничивания, предназначенной для подстройки питч-фактора и радиуса встрела пучка заметно повысило мощность выходного излучения. Однако использование корректирующей катушки негативно влияло на стабильность режима генерации, а измерение полной мощности выходного излучения было затруднено в связи с пробоями. Тем не менее, данный факт говорит о том, что благодаря оптимизации по питч-фактору выходную мощность в дальнейшем можно будет еще увеличить.

Измерение больших величин мощности в процессе эксперимента было затруднительно в связи с возникновением высокочастотных пробоев в выходном тракте. Очевидно, что для дальнейшей оптимизации прибора необходима доработка системы вывода и измерения выходного излучения.

В дальнейшем предполагается использовать полученные наработки для создания усилителя с аналогичными параметрами на основе гироклистронной схемы, ранее успешно отработанной для диапазона 8 мм [4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №14-29-00192.

- [1] Zaitsev N.I., Zapevalov S.A., Ilyakov E.V., Kornishin S.Yu., Kofanov S.V., Kryltsov M.Yu., Kulagin I.S., Lygin V.K., Malygin A.V., Manuilov V.N., Movshevich B.Z., Perminov V.G., Petelin M.I., Fiks A.Sh., Shevchenko A.S., Tsalolikhin V.I., Kladukhin V.V., Krasnykh A. 500 keV, 200A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 Hz // Proceedings of XXI Russian Accelerator Conference, 2008, Zvenigorod, pp. 339-341.
- [2] Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Rosenthal R.M, Zapevalov V.E., Zavolsky N.A. X-Band, High-Efficiency Relativistic Gyrotron // IEEE trans. on Plasma Sci., 2002, v.30, no.3, p.840-845.
- [3] Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Нечаев В.Е., Петелин М.И., Розенталь Р.М. Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2003, т.46, №10, с.914-918
- [4] Зайцев Н.И., Гвоздев А.К., Запевалов С.А., Кузиков С.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Плоткин М.Е.. Экспериментальное исследование мультимегаваттного импульсного гироклистрона // Радиотехника и электроника. 2014, том 59, № 2, с. 179–183.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОДА ANGEL ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН

Авторами разрабатывается программный комплекс ANGEL [1] предназначенный для расчета и оптимизации электронно-оптических систем гироприборов. На сегодняшний день ANGEL позволяет решать задачи разработки электронной оптики приборов в азимутально-симметричном случае, а также учитывать нарушения азимутальной симметрии эмиссии и магнитного поля [2]. Программа может рассчитывать как традиционные магнетронно-инжекторные пушки, так и пушки с приосевыми пучками, многокатодные системы. Имеется возможность проводить траекторный анализ до коллектора и оценивать тепловые нагрузки на его стенки, рассчитывать коллекторы с рекуперацией, конфигурации с ферромагнитными вставками и постоянными магнитами.

В настоящее время остается актуальной задача повышения частоты и мощности гироприборов. В частности, исследовалась возможность использования существующей электронно-оптической системы [3] для разрабатываемого релятивистского гиротрона с рабочей частотой 100 ГГц [4]. Были рассчитаны зависимости параметров пучка (питч-фактор – отношение вращательной и продольной скоростей электронов, скоростной разброс, отраженный ток) от напряжения и тока пучка, динамика изменения параметров на фронте импульса ускоряющего напряжения, оценено влияние на пучок сдвига катода и пушки в целом. Исследованы неадиабатические эффекты [3,5], которые привели к немонотонной зависимости параметров пучка от

роста ускоряющего напряжения. Проведенные на изготовленном разборном прототипе эксперименты показали достоверность моделирования.

Возможности моделирования неосесимметричных систем были использованы в численном эксперименте по исследованию влияния на параметры пучка несоосности гиротрона диапазона 260 ГГц и магнитной системы. Рассмотрены параллельные смещения оси магнита относительно оси гиротрона до половины длины волны и рассчитаны параметры пучка



по азимуту. Показана существенная (25–30%) зависимость среднего питч-фактора в пучке от азимутального угла (рис.1).

В качестве модельной задачи спроектирован коллектор с разделением электронного потока на энергетические фракции для двухступенчатой рекуперации

остаточной энергии электронов. В качестве исходных данных использовался рассчитанный энергетический спектр электронного пучка на выходе из пространства взаимодействия. Для разделения энергетических фракций в коллекторной области использовалась предложенная в работе [6] магнитная система с "касповой" конфигурацией магнитного поля. Расчеты свидетельствуют о возможности снижения тепловой нагрузки на коллектор примерно на 30% по сравнению со схемой с одноступенчатой рекуперацией энергии.

Другим методом, позволяющим получить приемлетепловые нагрузки, мые является использование ферромагнитных вставок и экранов [7] в области коллектора. Для мощного гиротрона на 170 ГГи выполнен расчет коллектора диаметром 300 мм с использованием ферромагнитной вставки и коллекторной катушки [8] (рис. 2). При этом магнитное поле для кола ANGEL залается таблицей из внешнего



файла, формируемого, например, с помощью программы ELCUT. Ферромагнитные вставки позволяют в 3 раза снизить тепловую нагрузку на стенку коллектора за счет увеличения площади оседания пучка, а их комбинация с дополнительной катушкой с пилообразным напряжением дает снижение тепловой нагрузки в 9 раз.

- [1] Планкин О.П., Семенов Е.С. //Вестник НГУ, серия «Физика». Новосибирск: НГУ. 2013. Т.8, №2. С.44.
- [2] Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М. //Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т.23, №3. С.94.
- [3] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С. и др. //Известия ВУЗов. Радиофизика. 2004. Т.47, №5-6. С.453.
- [4] Абубакиров Э.Б., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г. и др. //Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т.23, №2, С.94.
- [5] Лыгин В.К., Цимринг Ш.Е. // ЖТФ. 1973. Т. 43, No 8. C. 1695
- [6] I.Kulagin, V.Manuilov, M.Petelin, N.Zaitsev //Proc. of the Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas, N.Novgorod /ed.A.Litvak, 1997, v.2, p.723.
- [7] Гольденберг А.Л., Бородачева Т.В., Мануилов В.Н., Малыгина О.О. //Радиотехника и электроника. 1995. Т.61,№8. С.1292.
- [8] Мануилов В.Н., Фикс А.Ш. //Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар: Межвуз. сб. научн. тр. Кн. 2. Саратов: Изд-во Гос. УНЦ «Колледж», 1996. С.138

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РЕЗОНАТОРАХ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ МНОГОЧАСТОТНЫХ ГИРОТРОНОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ И ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Зуев А.С., Седов А.С.

Институт прикладной физики РАН

Разработка источников непрерывного высокостабильного излучения субтерагерцового и терагерцового диапазона различного уровня выходной мощности с возможностью плавной или ступенчатой перестройки частоты представляет интерес для многих приложений. Одним из наиболее перспективных источников миллиметрового диапазона длин волн является гиротрон. Появление и быстрый прогресс «сухих» (не использующих криогенных жидкостей) криомагнитных систем делает весьма привлекательным разработку гиротронов для разных приложений в этом диапазоне частот.

В докладе рассмотрены два варианта частотно-перестраиваемых гиротронов для работы в интервале частот 0.2-0.26 ТГц с различным уровнем выходной мощности: 1й - 200 Вт и 2й - 200 кВт [1]. Гиротроны проектируются для работы с «сухим» криомагнитом фирмы JASTEC (Япония), максимальное магнитное поле 10 Тл, проходное отверстие 100 мм. В качестве основной моды была выбрана TE_{19,8}. Расчёты проводились сначала в приближении фиксированной продольной структуры поля, а затем уточнялись с помощью самосогласованной модели взаимодействия ВЧ поля с винтовым электронным пучком (ВЭП) [2]. Численное моделирование процессов взаимодействия в резонаторах гиротронов проводились с учётом скоростного разброса электронного пучка - 30%. Полный КПД гиротрона с учётом скоростного разброса [2] вычислялся по формуле

$$\eta_{BLX} = (1 - Q/Q_{OM}) \int_{0}^{0} \upsilon_{\parallel} f_{e}(\upsilon_{\perp}) (\upsilon_{\perp}/\upsilon_{\parallel})^{2} \eta_{\perp}(\upsilon_{\perp}) d\upsilon_{\perp} , \qquad (1)$$

где Q и Q_{om} - полная и омическая добротности резонатора, f_e - нормированное распределение электронного пучка по скоростям.

Определены оптимизированные значения КПД многочастотных гиротронов: 18% для 1-го гиротрона и 33% для 2-го гиротрона, при этом электронные КПД принимали значения 32% и 38% соответственно. КПД ограничен в случае 1-го гиротрона интегральными омическими потерями в резонаторе и принятым минимальным напряжением (10 кВ) [1], необходимым для формирования электронного пучка, во втором случае - удельной тепловой нагрузкой, ограничивающей возможности оптимизации. Заметим, что в случае 2-го гиротрона омические потери несущественно влияют на уменьшение выходного КПД.

Для увеличения диапазона плавной перестройки частоты рассмотрена возможность использования рабочих мод с большим числом продольных вариаций. Также исследована ступенчатая перестройка частоты генерации за счёт последовательного возбуждения мод резонатора при изменении магнитного поля. Возможность перестройки рассматривалась для гиротрона с выходной мощностью 200 кВт с рабочими модами: $TE_{16,6}$ (203 ГГц), $TE_{18,7}$ (235,5 ГГц), $TE_{19,8}$ (260 ГГц), $TE_{21,9}$ (292 ГГц), $TE_{22,10}$ (317 ГГц), частота соседней моды от основной отличается на ~ 9%. Для возбуждения более высокочастотных мод, чем основная мода $TE_{19,8}$, требуется криомагнит с магнитным полем большим, чем 10 Тл, криомагниты с магнитным полем 12-13 Тл выпускаются несколькими фирмами. На рисунке 1 представлена зависимость выходного КПД от генерируемой частоты для основной моды $TE_{19,8}$ и двух соседних мод ($TE_{-16,9}$ и $TE_{-17,9}$), полученная на основе самосогласованной модели.



Рассмотрена возможность повышения КПД гиротронов при использовании одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов [3]

$$\eta = \frac{W}{W - W_{\min}} \eta_{Gbix} , \qquad (2)$$

здесь W - полная энергия электронов, W_{min} - минимальная энергия обработанного пучка. КПД гиротронов с рекуперацией составили 30% и 44% для 1-го и 2-го гиротронов соответственно.

Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ 15-42-02380 р_поволжье_а.

[1] Запевалов В.Е., Зуев А.С. //В кн.: Тр. XIX-ой научн. конф. по радиофизике. /Ред. В.В. Матросов, С.В. Оболенский. –Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2015, с. 52.

[2] Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004.

[3] Н.П.Венедиктов, М.Ю.Глявин, В.Е.Запевалов, А.Н.Куфтин, Изв. Вузов Радиофизика, 41, №5, 1998, с.670-680.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ МНОГОЧАСТОТНЫХ ГИРОТРОНОВ

Запевалов В.Е., Зуев А.С., Планкин О.П., Семенов Е.С.

Институт прикладной физики РАН

Олним из ключевых моментов разработке гиротронов является в проектирование электронно-оптических систем. В докладе рассмотрены два варианта электронно-оптических систем (**ЭОС**) для проекта частотноперестраиваемых гиротронов. предназначенных для работы в интервале частот 0.2-0.26 ТГц с различным уровнем выходной мощности (200 Вт и 200 кВт) [1]. Гиротроны проектируются для работы с «сухим» криомагнитом, имеющим максимальное поле 10 Тл и проходное отверстие 100 мм. Исходя из анализа процессов взаимодействия, получены исходные данные для проектирования двух вариантов магнетронно-инжекторной пушки (МИП) для обоих гиротронов. Предварительные оценки ЭОС проводились с помощью адиабатической теории [2], а траекторный анализ - с помощью программы ANGEL-2DS [3].

Для гиротрона с выходной мощностью 200 кВт и током 10 А оптимальным является использование катода диаметром около 50 мм. Делать катод меньшего диаметра проблематично, поскольку он будет располагаться ближе к магниту, в большем магнитном поле, а для сохранения заданного питч-фактора $g = v_{\perp}/v_{||}$ необходимо увеличивать электрическое поле на катоде, что может привести к электрическому пробою. Для устойчивой работы гиротрона был выбран питч-фактор g = 1.25, при больших значениях может стать существенным отражённый ток. Эскиз соответствующей электронной пушки представлен на рис 1.

В рабочем режиме при ширине эмитирующего пояска 3 MM $(i \approx 2.12 \text{ A/cm}^2)$ позиционный скоростной разброс находится на 1.5-2% уровне а начальный скоростной разброс задавался порядка 30%. Изучено возмущающее влияние на параметры электронного пучка сдвига пушки относительно магнита и сдвига катода относительно анода. Выяснено, что при сдвигах на 1 мм катодного узла, питч-фактор изменяется в пределах 1.21-1.29, а при слвигах катода относительно анода на



1 мм питч меняется в пределах 1.13-1.40. В случае приближения катода к аноду (питч 1.4) возможно появление небольшого отраженного тока на уровне 1%. Также

рассмотрена возможность изменения режимов МИП для плавной перестройки частоты в диапазоне магнитных полей 9.6-10.6 Тл.

Для маломощного гиротрона [1] можно использовать катоды меньшего диаметра и использовать узкий эмиттер шириной 1 мм. Оптимальным на наш взгляд является катод диаметром 40 мм, поскольку с уменьшением размеров растет чувствительность пушки к тепловым смещениям катода и к точности изготовления. Согласно расчетам, для предложенного катода допустимы тепловые смещения в пределах 0.5 мм, а параметры пучка практически не зависят от тока.

Выполнены оценки максимальной тепловой нагрузки на коллекторы гиротронов. Для работы в квазинепрерывном и непрерывном режимах средняя плотность мощности, рассеиваемая на коллекторе, не должна превышать 0.5-0.7 кВт/см². Предложены два варианта цилиндрических коллекторов, имеющих диаметры 250 мм и 70 мм для гиротронов с выходной мощностью 200 кВт и 200 Вт соответственно. Расчёты проведены для случая отсутствия генерации - наибольшей нагрузки на коллектор. Для мощного гиротрона диаметр коллектора ограничен снизу высокой плотностью мощности падающего потока электронов (средняя плотность мощности составляет 0.75 кВт/см², а пиковая - 1.5 кВт/см² для диаметра 250 мм), а для маломощного - необходимостью размещения внутри гиротрона квазиоптического преобразователя, который занимает некоторое пространство за резонатором. В случае маломощного гиротрона средняя тепловая нагрузка на коллектор составляет 28 Вт/см² (пиковая - 57 Вт/см²), что позволяет обойтись без интенсивного водяного охлаждения. На рис. 2 представлен эскиз МИП и цилиндрического коллектора для гиротрона с выходной мощностью 200 кВт.



Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ 15-42-02380 р_поволжье_а.

- [1] Запевалов В.Е., Зуев А.С. //В кн.: Тр. XIX-ой научн. конф. по радиофизике. /Ред. В.В. Матросов, С.В. Оболенский. –Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2015, с. 52.
- [2] Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012, с. 493.
- [3] Планкин О.П., Семенов Е.С. //Вестник НГУ, серия «Физика». Новосибирск: НГУ. 2013. Т.8, №2. С.44.

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АНАЛИЗАТОРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В МОЩНЫХ ГИРОТРОНАХ

А.В. Климов, В.Н. Мануилов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время гиротроны лидируют среди источников мощного когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Характеристики данного прибора определяются параметрами формируемого магнетронно-инжекторной пушкой (МИП) винтового электронного пучка (ВЭП): питч-фактором *g*, величиной скоростного разброса δv_{\perp} и функцией распределения электронов в пучке по осцилляторным скоростям $f(v_{\perp})=dl/dv_{\perp}$ [1-2]. Поэтому для создания гиротронов с высокими выходными характеристиками требуется точное определение указанных параметров ВЭП [2-3].

Разработка МИП включает два основных этапа. Сначала на базе двумерных статических моделей численными методами производится поиск геометрии и электрического режима МИП с приемлемыми характеристиками g, δv_{\perp} и $f(v_{\perp})$ формируемого пучка. Далее с помощью анализатора ВЭП проводится экспериментальное измерение перечисленных параметров и сравнение с расчетными для получения надежных данных о скоростном распределении в пучке.

Рассматривается методика численного расчета анализатора электронных пучков, работающего на принципе тормозящего электрического поля [4], учитывающая 3-мерность электродной конфигурации. Для траекторного анализа используется пакет CST STUDIO SUITE, позволяющий найти решение самосогласованной системы уравнений пучка в статическом режиме. Моделирование пучка основывается на методе трубок тока, для реализации которого проводится дискретизация электронного пучка и для каждой трубки тока задаются координаты и скорости частиц на входе в анализатор. Обработка данных численного расчета производится с помощью препроцессора и постпроцессора, написанных в среде MATLAB. Постпроцессор позволяет восстановить функцию распределения по осцилляторным скоростям и сравнить ее с заданной на входе анализатора и на этой основе вычислить ошибки измерений параметров пучка, вносимые расчетным анализатором.

Целью представленной работы является проверка корректности предложенной ранее методики расчета анализатора ВЭП, а также минимизация ошибок при обработке кривой отсечки. Совместно с этим, требуется уменьшение расчетного количества точек дискретной кривой отсечки, чтобы снизить время расчета и затраты на компьютерные ресурсы.

Для достижения поставленных целей была решена пробная идеализированная задача, в которой реальная кривая отсечки, рассчитанная в CST STUDIO SUITE, заменялась кривой, полученной интегрированием заданной функции Гаусса (рис. 1). По минимально возможному количеству точек N проводилась регуляризация интегральной кривой различными методами. Затем интегральная кривая дифференцировалась методом конечных разностей и сравнивалась с заданной функцией Гаусса. При этом приемлемой ошибкой численного дифференцирования считается $\delta \leq 5\%$.



Рис. 1. Получение идеальной кривой отсечки путем интегрирования заданной функции распределения на входе f(v_) в виде функции Гаусса.

В результате была подтверждена корректность предложенной ранее методики и проведена оптимизация алгоритма для этапа обработки кривой отсечки и выходной функции распределения. Поиск подходящего метода обработки кривой отсечки позволит существенно уменьшить время расчета и повысить точность алгоритма. Требуемую точность дифференцирования обеспечивает кусочно-кубическая сплайн-интерполяция кривой отсечки. В дальнейшем планируется минимизировать ошибки алгоритма на этапе расчета в среде CST STUDIO SUITE и распространить методику на реальные модели электростатического и магнитного анализаторов.

- Thumm, M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013), KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), 2014. 1-138 pp.
- [2] Nusonovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons, John Hopkins University press, 2004. - 352 p
- [3] Ергаков В.С. Моисеев М.А. Эрм Р.Э. Влияние разброса скоростей на характеристики гиротрона. - Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1980, №3, с. 20
- [4] Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Zapevalov V.E. Advanced numerical and experimental investigation for gyrotrons helical electron beams. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves, V.20, No.3, 1999. 361-382 pp.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В РЕЗКО-НЕОДНОРОДНОМ Р-N ПЕРЕХОДЕ

Н.С. Кузьмичев, А.А. Потехин, И.Ю. Забавичев

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Для анализа характеристик полупроводниковых структур может использоваться CV метод, который заключается в измерении вольт-фарадной характеристики исследуемого прибора. Из-за того, что измеренная полупроводниковая емкость зависит от концентрации легирующей примеси, то путем дифференцирования вольт-фарадной характеристики можно определить профиль распределения основных носителей заряда. Очевидно, что чем точнее измерена емкость, тем точнее можно рассчитать профиль носителей заряда структуры. Восстановленный таким образом профиль распределения носителей заряда может использоваться в качестве исходных данных для физико-топологического моделирования, поэтому погрешность расчета профиля также определяет погрешность моделирования.

Проведение измерений зависимости емкости полупроводниковой структуры от приложенного к ней напряжения имеет ряд особенностей. Для того чтобы измеренная барьерная емкость приближалась к реальной, амплитуда измерительного сигнала должна быть достаточно малой. Это связано с тем, что в этом случае флуктуация заряда, связанная с амплитудой измерительного сигнала, много меньше значения заряда в обедненной области, соответствующего приложенному к структуре смещению [1]. На результаты малосигнальных измерений оказывают большое влияние различного рода шумы. Для минимизации этого эффекта можно увеличить амплитуду измерительного сигнала, но при этом уменьшится точность вычисления профиля распределения носителей заряда из-за нарушения, описанного выше условия.

Целью данной работы является исследование влияния таких параметров измерительного сигнала как амплитуда, частота и напряжение смещения на погрешность восстановления профиля распределения носителей заряда в резконеоднородном p-n переходе. Для этого были проведены серии экспериментов по измерению емкости полупроводникового диода с помощью прецизионного LCR – метра Keysight Technologies E4980A [2]. Данный прибор подходит для измерений небольших емкостей ~ 1–10 пФ, так как имеет заявленную производителями погрешность измерений в данном диапазоне ~ 10 фФ. Существуют измерительные приборы более высокого класса точности, но методика и результаты исследований, приведенные в данной работе, справедливы и для них, так как соотношение измеряемой емкости и погрешности измерений обычно того же порядка.

Экспериментальные исследования заключались в измерении вольт-фарадной характеристики диода, изучении влияния амплитуды и частоты измерительного сигнала на погрешность измерений, а также в восстановлении профиля распределения носителей заряда. В качестве погрешности измерения было выбрано среднеквадратичное отклонение внутри одной выборки результатов измерений. Измеренная зависимость емкости диода от амплитуды измерительного сигнала для разных обратных напряжений смещения позволяет заключить, что в диапазоне амплитуды сигнала от 0 до 0,2 В емкость полупроводникового диода остается практически постоянной. Другими словами, малосигнальное приближение выполняется в более широком диапазоне амплитуд, нежели согласно теоретическим оценкам [1]. Этот факт позволяет использовать для измерений емкости сигналы с большей амплитудой без ущерба точности проводимых измерений.

Выбор частоты измерительного сигнала также существенно влияет на точность проводимых измерений. Исходя из измеренной зависимости погрешности измерений емкости полупроводникового диода от частоты измерительного сигнала, можно выделить диапазоны частот, для которых эта погрешность будет минимальной. Для интервалов частот около 100, 200 и 1000 кГц погрешность измерений составляет приблизительно 1 %. Наличие на графике зависимости чередующихся областей минимумов и максимумов инструментальной погрешности связано с переключением прибора на другой диапазон сопротивлений, а, следовательно, и точностей. Представленные выше интервалы частот могут оказаться полезными для исследования вольт-фарадных характеристик с помощью измерительных сигналов различной частоты с целью получения информации о динамике ловушек и глубоких уровней.

Итак, проведены исследования влияния параметров измерительного сигнала на погрешность восстановления профиля распределения носителей заряда в резконеоднородном p-n переходе. Предложены диапазоны амплитуды и частоты измерительного сигнала оптимальные с точки зрения погрешности измерений емкости.

- Blood, P. The electrical characterization of semiconductors: majority carriers and electron states / Blood P., Orton J.W. - Academic Press, London, 1992. - 692 p
- [2] http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4980-90210.pdf?id=789356

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУХСВЯЗНОЙ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ S-ОБЛАСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

М.М. Венедиктов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород

Весьма актуальным для установления основных закономерностей воздействия импульсных магнитных полей на поверхность полупроводников, границу раздела «полупроводник-диэлектрик» и непосредственно на диэлектрик структур МОП представляется проведение экспериментальных исследований воздействия ИЭМП на полупроводники и интерпретация полученных результатов.

Для решения этой проблемы был разработан новый статистический метод обработки экспериментальных данных с учётом малой выборки образцов: метод двухсвязной доверительной *S*-области.

Для реализации метода необходимо установить верхнюю и нижнюю границы распределения. Для этого нужно определить двухсвязную доверительную *S*-область с доверительной вероятностью $\gamma = 1 - \alpha$. Пусть (U, V) - статистика большого порядка (генеральная совокупность); (u, v) - статистика малого порядка (выборка); U, u - нижние минимальные значения случайной величины в этих статистиках, а V, v - верхние максимальные значения распределены случайным образом по двум независимым осям для ряда независимых выборок, можно определить A(s) как площадь доверительной области.

Далее рассмотрено практическое применение этого подхода для анализа влияния ИЭМП на интегральный радиационно-критический параметр биполярных транзисторов – h21E – коэффициент усиления в схеме с общим эмиттером (ОЭ).



Коэффициенты усиления ГИС измерялись «до» и «после» воздействия ИЭМП. По результатам были построены две двухсвязные доверительные S-области, определены координаты «геометрического центра» областей. Величину значимого эффекта Δх определяют в этом случае путём сравнения смещения «геометрического центра» S-областей, построенных по результатам

измерения экспериментальных данных «до» и «после» обработки ИЭМП.

При графическом анализе результатов выявлена тенденция положительного изменения ∆х — – коэффициента усиления после воздействия ИЭМП (увеличения значений). Величины изменений превышают погрешность оценки параметра h21E. Полученный результат однозначно говорит об увеличении коэффициента усиления после обработки ИЭМП. Таким образом, предложен метод двухсвязной доверительной S-области, позволяющий проводить оценки параметров распределения ограниченных статистик и удовлетворяющий критерию минимальной информации.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОРОГА НАСТУПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ

М.М. Венедиктов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород

Ниже приведен анализ точности прогнозирования величины аналитически установленного среднего значение порога наступления повреждения по результатам обработки выборочных данных среднего значения экспериментально установленной повреждающей мощности для различных типов образцов с использованием нормального и логарифмически нормального распределений.

Считаем, что коэффициент вариации λ повреждающей мощности распределён по логарифмически-нормальному распределению (в дальнейшем – логнормальному). Функция плотности такого распределения задана в виде

$$f_{\lambda}(\lambda) = \frac{1}{0.531\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\lambda} e^{-0.5(\frac{\ln\lambda - 1.69}{0.531})^2}$$
(1)

Функция (1) получена на основе обработки экспериментальных для 101 распределений величин повреждающей мощности для различных типов элементов.

Из данных расчётов стандартного квадратичного отклонения (СКО) с исполь-

зованием выражения $S_P = \left[\frac{1}{N-I}\sum_{i=1}^{N} \{P_{fi} - \bar{P}_f\}^2\right]^{1/2}$ для различных статистик следует, что максимальное СКО при одинаковых значениях повреждающей мощности \bar{P}_f реализуется для логнормального распределения \bar{P}_f /1,67 (для других распределений СКО составило: нормальное - \bar{P}_f /1,87, Вейбулловское - \bar{P}_f /1,92,

Вейбулл-экспоненциальное - $\bar{P_f}$ /2,01).

Проведены сравнения вычисленных данных об ожидаемой величине порогового значения мощности, полученных на основании использования расчётных данных при нормальном и лог-нормальном распределении импульсной повреждающей мощности (нормальное распределение – при степени доверия 98,5 % имеем

$$P_f = P_C/26$$
, лог-нормальное рапределение - при степени доверия 99,2 % -

 $\bar{P}_f = \bar{P}_C/37$). Из анализа полученных данных следует, что величины \bar{P}_f для логнормального распределения имеют значительно более сдержанные оценки по сравнению с аналогичными для нормального распределения для заметно большей степени доверия - на 1-2%.

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЕДИНИЧНЫХ СБОЕВ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕЛИЧИН ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

М.М. Венедиктов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород

Целью предложенного способа обработки результатов испытаний является повышение точности определения характеристик зависимости поперечного сечения от величины линейных потерь энергии (LET), а также определение минимального значения флюенса частиц F_{MIN} , достаточного для генерации эффектов SEU.

Суть предложенного метода состоит в том, что в способе оценки стойкости элементов цифровой техники к эффектам сбоев от единичных явлений (Single Event Upset = SEU) космического пространства (КП) в области малых значений LET в качестве теоретического закона распределения поперечного сечения для $LET>LET_{TH}$ принимают трёхпараметрический закон распределения Вейбулла

$$F_W(LET) = \frac{\sigma}{\sigma_{SAT}} \{ 1 - exp[-\frac{(LET - LET_{TH})}{\eta}]^{\beta} \}, \text{ где } LET_{TH} = \gamma - \text{ параметр}$$

положения, η - параметр масштаба, β - параметр формы

Для значений, меньших величины порогового значения линейных потерь, но больших величины их нулевого значения ($0 < LET < LET_{MAX}$), принимают равномерный закон распределения $pdf_U(LET) = \frac{\sigma}{\sigma_{MAX}} \cdot \frac{dLET}{b-a}$ с верхним граничным значе-

нием $b = LET_{MAX} = 100 \frac{M_{2}B \cdot cM^{2}}{M^{2}}$, нижним a = 0, учитывающий «предысторию»

возможности появления единичных сбоев, а затем сопоставляют указанные распределения и получают скорректированное минимальное значение потока частиц;

- для равномерного и Вейбуловского законов распределения принимают равными между собой функции распределения и определяют для указанных распределений сечения сбоев σ_{MIN} и минимальное значение потока частиц F_{MIN} ;

 для порогового значения линейных потерь *LET_{TH}* энергии частиц комбинированную величину интенсивности сбоев определяют в виде суммы величин интенсивности сбоев для равномерного и Вейбулловского законов распределения, а в остальном поступают аналогично;

 для равномерного и Вейбулловского законов распределения определяют величины ресурсов, а в качестве скорректированной величины ресурса для порогового значения линейных потерь энергии частиц принимают произведение указанных ресурсов, после чего поступают аналогично.

Затем, из полученного набора данных выбирают минимальное значение потока частиц $F_{IMIN}^{Critery}$ (наихудший случай).

МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

М.М. Венедиктов¹⁾, В.К. Киселев¹⁾, С.В. Оболенский²⁾

¹⁾ ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород ²⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В этой работе для оценки уровня стойкости использован метод [1], который позволяет повысить достоверность определения стойкости электронных компонентов к воздействию ионизирующего излучения (ИИ). Особенностью данной работы является использование отличного от патента [1] способа определения наиболее значимого вида ИИ с точки зрения силы его влияния на характеристики испытуемого объекта.

Согласно [1] оценка уровня стойкости ЭКБ осуществляется с помощью определения параметров функции распределения Вейбулла и вычисления зависимости параметрической или функциональной работоспособности от уровня воздействия ИИ. Способ выявления наиболее значимого вида ИИ с точки зрения наиболее сильного поражения испытуемого объекта в методе [1] основан на обработке экспериментальных данных и определения специальных интервалов по уровню спецвоздействия. В данной работе предложено использовать для определения (уточнения параметров) критического вида ИИ дополнительные расчеты, основанные на методах физико-топологического моделирования. Основной причиной ввода дополнительного этапа расчетов по сравнению с [1] является необходимость детализации особенностей взаимодействия ИИ с материалами электронной техники, и необходимости оценки вклада сложных процессов поглощения ИИ гетероструктурами и интерфейсами гетероструктур современных полупроводниковых приборов.

Результаты работы показали, что предложенное усложнение процедуры расчетов позволяет в некоторых случаях существенно уточнить границы указанных выше интервалов, описывающих незначительный и критический уровни изменения параметров испытуемого электронного компонента. Для апробации предложенного метода определения критического типа ИИ использованы эксперименты, описанные ранее в [2]. Результаты расчетов показали, что модификация метода [1] позволяет повысить точность прогнозирования радиационной стойкости по крайней мере для оптоэлектронных и СВЧ полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания (проект 2183, задание № 2014/134).

[1] Качемцев А.Н, Киселёв В.К., Корсакова Н.Г. Способ определения стойкости электронных компонентов и блоков радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений // Патент РФ № 2504862 от 17.07.12 г.

[2] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Дюков Д.И., Фефелов А.Г., Демидова Д.С. Моделирование мощных НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников. 12.2012. Т. 46. № 12. 2012. С. 1587–1593.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

А.В. Буневич, С.В. Оболенский

ННГУ им. Н.И.Лобачевского

Как известно, в большинстве современных вычислительных средств, системах радиолокации и связи используются полевые транзисторы и интегральные схемы на их основе. Кроме того, указанные полупроводниковые приборы могут быть созданы по специальной технологии, так что они будут иметь высокую радиационную стойкость, что обусловливает их использование в военной и космической технике.

Тенденции развития полупроводниковых приборов таковы, что характерные размеры активных областей транзисторов уменьшаются вплоть до нанометровых размеров, что сопоставимо с характерными размерами кластеров радиационных дефектов, возникающими в полупроводниковых структурах при нейтронном облучении. Такие кластеры являются препятствием на пути электронов и существенно ухудшают работы полупроводниковых приборов. Актуальным является исследование процессов формирования указанных кластеров с целью определения уровня радиационной стойкости перспективных транзисторов и интегральных схем, которые в будущем могли бы быть использованы в специальной аппаратуре.

Цель работы - моделирование структуры радиационных дефектов в твердотельных структурах современных полупроводниковых приборов методом Монте-Карло и определение уровней стойкости полупроводниковых приборов к нейтронному облучению.

В рамках работы было проведено моделирование структуры радиационных дефектов с помощью программы TRIM. Рассчитывались размеры и форма каскадов смещений атомов полупроводника в различных полупроводниковых материалах и структурах. Получено распределение субкластеров по размерам в каскаде столкновений. Кроме того, проведено сравнение процессов формирования кластеров дефектов в структурах аналоговых и цифровых интегральных схем, и получены статистические данные по образованию кластеров и субкластеров дефектов, на основе которых можно понять, что при слишком малых размерах активных областей транзисторов сильно повышается вероятность отказа в работе интегральных схем.

Результаты расчетов показали, что предложенный в работе подход позволяет учесть основные процессы формирования и стабилизации кластеров радиационных дефектов и позволяет оценивать уровень радиационной стойкости современных полупроводниковых приборов. Разработана методика проведения вычислений, которая может быть интересна специалистами – разработчикам специализированных интегральных схем и аппаратуры на их основе.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания (проект 2183, задание № 2014/134).