

Анализ параметров GaN-HEMT до и после гамма-нейтронного воздействия

© Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, О.Е. Галкин, А.В. Хананова, А.Б. Макаров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

E-mail: thelen@yandex.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Предложен метод математической обработки результатов измерений вольт-фарадных характеристик HEMT AlGaIn/GaN до и после γ -нейтронного облучения с флюенсом $0.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Описаны результаты физико-топологического моделирования HEMT AlGaIn/GaN на подложке SiC. Определена погрешность расчета параметров GaN-HEMT, обусловленная погрешностью вычисления профиля распределения электронов.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45108.22

1. Введение

Для решения задачи проектирования радиационно-стойких монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaN необходимо проведение численного моделирования с высокой точностью. Необходимым является расчет выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов, γ -параметров, коэффициента усиления и пр. Исходными данными для численных расчетов электрофизических параметров являются толщины и уровни легирования полупроводниковых слоев, информация о распределении и подвижности электронов [1,2]. В отличие от тестовых структур, современных HEMT (high electron mobility transistors) емкости изменяются в диапазоне 1.5–5 пФ, и различие вольт-фарадных характеристик (ВФХ) такого типа приборов до и после γ -нейтронного облучения флюенсом 10^{13} – 10^{15} см^{-2} и дозой 10^5 – 10^7 рад не превышает 0.01–0.1 пФ, что затрудняет проведение анализа радиационно-стимулированного изменения параметров транзисторов. Также открытым остается вопрос об обработке результатов измерений, так как стандартный дифференциальный анализ вольт-фарадных характеристик диодов AlGaIn/GaN имеет погрешность, связанную с ложным смещением профилей распределения электронов [3]. Поэтому требуется разработка дополнительного метода численного анализа, позволяющего верифицировать полученные из измерений данные.

В работе предложено использовать метод численной обработки ВФХ, комбинирующий методы Тихонова 1-го или 2-го порядка и сглаживание полученной зависимости рациональной функцией.

2. Постановка задачи

На рис. 1 приведено схематическое изображение исследуемого HEMT AlGaIn/GaN. Анализировалось изменение профиля распределения электронов в слое двумерного электронного газа (2DEG) до и после γ -нейтронного облучения с флюенсом $0.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Обозначим $F(u)$ вольт-фарадную характеристику транзистора, полученную с помощью методики, описанной в [3]. Пусть $F(u) = Fd_0(u)$ — ВФХ до облучения, $F(u) = Fp_0(u)$ — ВФХ после γ -нейтронного облучения транзистора флюенсом $0.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что значения $F(u_i)$ известны для некоторого конечного набора напряжений $a = u_0, u_1, \dots, u_r = b$. При этом величины $F(u_i)$ измерены не точно, а с некоторой погрешностью. Поэтому задача заключается в расчете значений $F(u_i)$ и построения профиля распределения концентрации электронов, т.е. зависимости величины $N(u) = k_N F^3(u)/F'(u)$ от величины $d(u) = k_d/F(u)$, где k_N и k_d — некоторые заданные числовые коэффициенты.

3. Алгоритмы и результаты решения задачи

Основной вопрос, возникающий при решении этой задачи, состоит в том, как вычислить производную $F'(u)$ от функции, заданной приближенно лишь в конечном наборе точек. В работе был выбран алгоритм, в котором метод наилучших рациональных приближений комбинируется с методом регуляризации Тихонова 1-го или 2-го порядка.

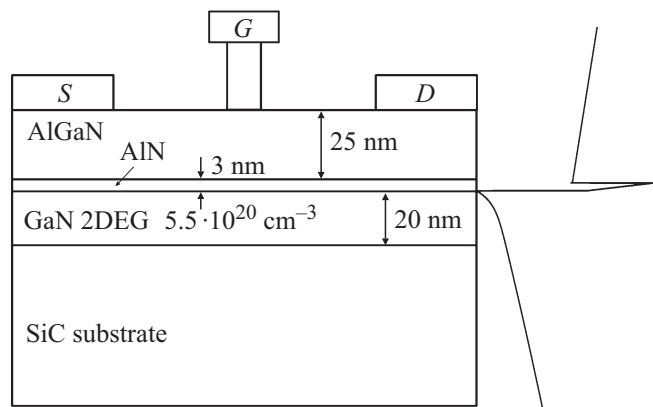


Рис. 1. Структура исследуемого GaN-HEMT и зонная диаграмма подзатворного слоя. S — исток, D — сток, G — затвор.

4. Описание алгоритма

Алгоритм состоит из 6 шагов.

1) Задаются целые неотрицательные числа m и n .

2) Заданная функция $F(u)$ сглаживается рациональными функциями $R = P/Q$, т.е. отношением многочленов P и Q некоторых степеней m, n соответственно. В частности, при $n = 0$ рациональная функция $R = P/Q$ сама является многочленом. Приближение выполняется методом наименьших квадратов, т.е. коэффициенты многочленов $P(u) = a_0 + a_1u + \dots + a_mu^m$ и $Q(u) = b_0 + b_1u + \dots + b_nu^n$ подбираются так, чтобы минимизировать по a_0, a_1, \dots, a_m и b_0, b_1, \dots, b_n величину отклонения:

$$\begin{aligned} & [R(u_1) - F(u_1)]^2 + \dots + [R(u_r) - F(u_r)]^2 \\ &= \sum_{k=0}^r \left[\frac{a_0 + a_1u_k + \dots + a_mu_k^m}{b_0 + b_1u_k + \dots + b_nu_k^n} - F(u_k) \right]^2. \quad (1) \end{aligned}$$

Для минимизации (1) применяются: методы Ньютона, градиентного спуска, а также случайный поиск [4]. Далее, используя найденное рациональное приближение $R = P/Q$, рассчитываем и строим профиль распределения электронов по формулам $N_R(u) = k_N R^3(u)/R'(u)$ и $d_R(u) = k_d/R(u)$.

3) В точках u_0, u_1, \dots, u_r вычисляется разность $G(u)$ исходной функции $F(u)$ и сглаженной функции $R(u)$: $\delta F(u_k) = F(u_k) - R(u_k)$, $k = 1, \dots, r$.

4) Функцию $\delta F(u)$ сглаживаем методом Тихонова, заодно находя производную $g(u)$ сглаженной функции $G(u)$ [5,6]. В методе Тихонова сглаженная функция $G(u)$ имеет вид $G(u) = \int_a^u g(x)dx + C$, где функция $g(u)$ и константа C подбираются так, чтобы минимизировать функционал (2):

$$\begin{aligned} & \int_a^b \left[\int_a^u g(x)dx + C - F(u) \right]^2 du \\ &+ \int_a^b \left[\alpha g^2(u) + \beta g'^2(u) + \gamma g''^2(u) \right] du. \quad (2) \end{aligned}$$

При этом значения неотрицательных параметров α, β и γ должны быть достаточно малы и выбираются из некоторых дополнительных соображений. Для минимизации функционала (2) можно использовать соответствующее уравнение Эйлера. При $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma = 0$ получим метод Тихонова 1-го порядка, при $\alpha > 0, \beta = 0, \gamma > 0$ получим метод Тихонова 2-го порядка.

5) Вычисляется приближение $\Phi(u)$ для исходной функции $F(u)$ и приближение $\Phi'(u)$ для производной $F'(u)$: $\Phi(u) = R(u) + G(u)$; $\Phi'(u) = R'(u) + g(u)$. Далее проводится вычисление сглаженных профилей по формулам $N_\Phi(u) = k_N \Phi^3(u)/\Phi'(u)$ и $d_\Phi(u) = k_d/\Phi'(u)$.

6) Если профили $N_\Phi(u)$ и $d_\Phi(u)$, построенные с применением метода Тихонова, слабо отличаются от профилей

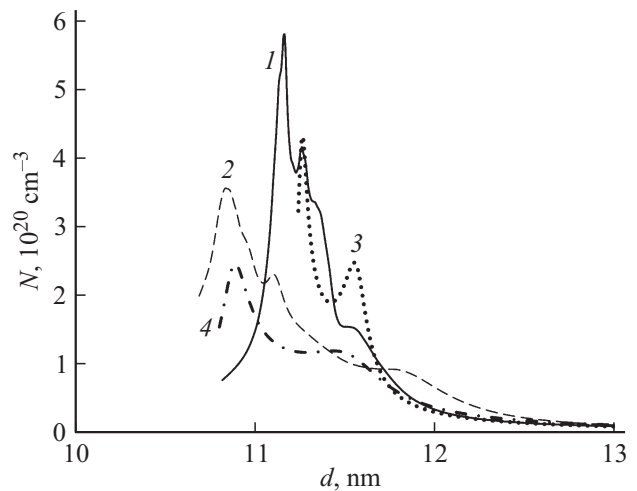


Рис. 2. Результаты расчетов профилей распределения электронов N в GaN-HEMT до (1) и после (2) облучения нейтронами флюенсом $0.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с использованием рационального приближения и метода Тихонова 1-го порядка, а также полученные стандартным методом [3] до облучения (3) и после облучения (4).

$N_R(u)$ и $d_R(u)$, соответствующих рациональному приближению $R(u)$, считается, что эти профили $N_\Phi(u)$ и $d_\Phi(u)$ являются реальными профилями. В противном случае повторяется весь алгоритм действий 1)–6) с другими парами степеней m, n до выполнения итогового условия.

Данный подход к обработке графика функции позволил полностью восстановить профиль распределения электронов в исследуемой гетероструктуре (рис. 2). Помимо определения положения максимума профиля [3] был также восстановлен подлежащий слой. Наблюдается характерное смещение профиля распределения электронов после нейтронного облучения, аналогичное описанному в [3].

5. Моделирование

Использование математической обработки результатов измерений крайне важно при оценке радиационной стойкости приборов, так как концентрация электронов в канале HEMT определяет значение тока стока транзистора.

Был проведен расчет выходных вольт-амперных характеристик GaN-HEMT на участке насыщения для разных значений максимума профиля концентрации электронов при фиксированном напряжении затвора. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментально полученными ВАХ. Погрешность расчета не превысила 10%, что свидетельствует о корректности определения профиля распределения электронов с помощью предложенной математической обработки. В таблице показано, что при ошибке в значении максимума концентрации (dn_{\max}) в 3–5% погрешность в расчете тока может достигнуть 5–10%, ошибка на 10% по концентрации, дает

Оценка погрешности расчета

$dn_{\max}, \%$	$dI_d, \%$	$dT_{\max}, \%$
0	0	0
3	5	7
5	10	12
10	20	25
20	50	35

погрешность в расчете выходного тока (dI_d) 10–20%, а погрешность в 20% может привести к ошибке более чем в 2 раза.

Кроме того, погрешность в оценке значения концентрации электронов может привести к некорректному расчету температуры в кристалле транзистора, что в свою очередь приводит к неправильной оценке уровня стойкости прибора. В таблице приведены данные о процентном изменении максимальной температуры канала транзистора (dT_{\max}) при различной погрешности определения значения максимума профиля распределения электронов.

Таким образом, большая ошибка при расчете температуры канала может привести и к неправильному анализу радиационной стойкости прибора.

С использованием данных по распределению концентрации электронов, полученных для GaN в этой работе и для GaAs в [3], был проведен аналитический расчет изменения выходного тока транзистора I_d на основе GaAs и GaN в зависимости от флюенса нейтронного облучения F с учетом и без учета нагрева канала транзистора (рис. 3).

Как видно из рисунка, нагрев канала в GaAs- и GaN-HEMT приводит к увеличению концентрации носителей заряда. В GaAs-HEMT этот эффект играет положительную роль, так как может частично компенсировать

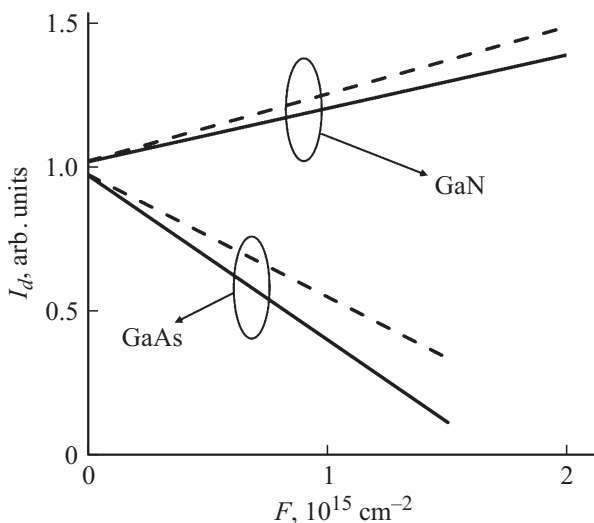


Рис. 3. Расчет зависимости выходного тока I_d GaN- и GaAs-HEMT от флюенса нейтронов с учетом (штриховая линия) и без учета (сплошная) нагрева канала.

потерю тока из-за образования большого количества кластеров и субкластеров радиационных дефектов. Однако разогрев канала не сможет полностью компенсировать влияние облучения. В GaN-HEMT количество образующихся дефектов не так велико [3], поэтому нагрев приводит к еще большему увеличению тока в канале, что в свою очередь приводит к ускорению процесса лавинного пробоя. Таким образом, в GaN-HEMT нагрев канала во время облучения приводит к скорой деградации прибора.

С целью проверки корректности предложенного метода определения профиля электронов было проведено физико-топологическое моделирование параметров GaN-HEMT на подложке SiC, со структурой, аналогичной структуре в работе [7], с учетом температурных эффектов. В работе исследовался GaN-HEMT на основе усовершенствованной гетероструктуры, в которую введен тонкий слой (спейсер) AlN между буферным слоем GaN и барьерным слоем AlGaIn (рис. 1). Влияние такой модификации гетероструктуры было рассмотрено в работе [8]. Сильный поляризационный эффект от введения барьерной прослойки AlN, который имеет большую ширину запрещенной зоны по сравнению с AlGaIn, толщиной не более 3.5 нм, приводит к возрастанию концентрации электронов 2DEG, до $n_s = 3.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, и значительному повышению подвижности электронов μ_e , до $2200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, в силу того что уменьшается вероятность проникновения электронов в AlGaIn [2]. Благодаря новой конструкции была получена максимальная выходная удельная мощность 8.6 Вт/мм на частоте 40 ГГц при длине затвора 150–180 нм, максимальная частота работы прибора составила 120 ГГц [7].

Однако, несмотря на указанные преимущества, одним из важных недостатков GaN-HEMT является большой саморазогрев протекающим током. Большой ток в канале приводит к росту температуры кристаллической решетки на 100 К и более, что в свою очередь приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны и подвижности электронов почти в 10 раз. Уменьшение подвижности электронов приводит к уменьшению выходного тока транзистора с ростом рабочего напряжения [9] и к появлению отрицательного наклона в области насыщения зависимости тока стока от напряжения на нем. Расчет выходных ВАХ $I_d(U_d)$ GaN-HEMT с учетом тепловых эффектов приведен на рис. 4. Указанные эффекты являются причиной уменьшения выходной мощности транзистора.

Величина саморазогрева главным образом зависит от материала подложки транзистора [11]. В [11] показано, что транзисторы на подложке SiC нагреваются значительно меньше, чем на сапфировой подложке. В результате расчетов получено, что сапфир, несмотря на то что его теплопроводность меньше на порядок теплопроводности SiC (0.3 против 5 Вт/см·К), имеет ряд преимуществ в плане дешевизны и простоты технологии выращивания полупроводниковых структур на нем в сравнении с SiC. Альтернативным методом по устранению воздействия саморазогрева на характеристики GaN-HEMT на сапфировой подложке является

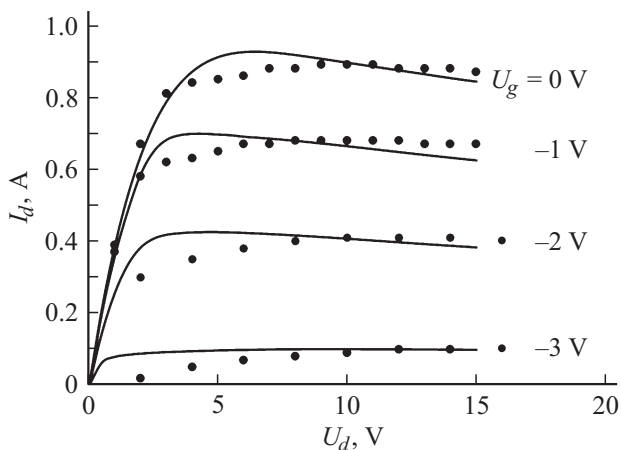


Рис. 4. Стоковые характеристики GaN-HEMT при разных потенциалах на затворе U_g : сплошные кривые — данная работа, точки — работа [10].

технология flip-chip [12], при которой структура транзистора монтируется в материал с большой теплопроводностью, такой как AlN, теплопроводность которого равна ~ 1.8 Вт/см \cdot К.

В результате расчетов получено, что технология flip-chip уменьшает разогрев устройства (максимальная температура в канале 540 К) по сравнению с обычным транзистором на сапфировой подложке (максимальная температура в канале 800 К). Тем не менее транзистор на подложке SiC разогревается меньше всего (максимальная температура в канале 404 К). Таким образом, корректный расчет температуры при оценке влияния технологии flip-chip также возможен только при использовании описанного в работе подхода к оценке распределения концентрации электронов.

6. Заключение

Предложенный метод обработки вольт-фарадных характеристик современных HEMT, измеренных с низкой погрешностью, комбинирующий метод рациональных приближений и методы регуляризации Тихонова 1-го и 2-го порядков, позволил восстановить профили распределения электронов в канале GaN-HEMT до и после γ -нейтронного облучения с флюенсом $0.4 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик свидетельствует об адекватности данного подхода к обработке экспериментальных ВФХ.

С использованием полученных результатов проведен расчет передаточных характеристик GaAs- и GaN-HEMT при нейтронном облучении с различным уровнем флюенса, с учетом и без учета нагрева канала транзистора. Учет температурных эффектов позволил определить уровни радиационной стойкости приборов.

В результате проведенного физико-топологического моделирования HEMT AlGaIn/GaN выявлены преимущества использования технологии flip-chip для уменьшения процесса саморазогрева транзистора.

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ № 14-02-0058, 15-02-07935, 15-47-02294-р_поволжье_a, МОН РФ (соглашение от 27.09.2013 г. № 02.В.49.21.003) и государственным заданием МОН РФ (код проекта 2183).

Список литературы

- [1] Н.В. Басаргина, И. Ворожцова, С.М. Дубровских, О.В. Ткачев, В.П. Шукайло, Е.А. Тарасова, А.Ю. Чурин, С.В. Оболенский. Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, **1** (3), 61 2013.
- [2] Ю.А. Матвеев, Ю.В. Федоров. Нано- и микросистемная техника, № 5, 39 (2011).
- [3] Е.А. Тарасова, Е.С. Оболенская, А.В. Хананова, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, А.В. Неженцев, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацуньников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Г.В. Медведев. ФТП, **50** (12), 1599 (2016).
- [4] В.И. Бердышев, Л.В. Петрак. *Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приложения* (Екатеринбург, ИММ УрО РАН, 1999).
- [5] А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. *Методы решения некорректных задач* (М., Наука, 1979).
- [6] Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. *Численные методы* (М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008).
- [7] Yifeng Wu, Primit Parikh. *Intern. Symp. Compound Semiconductor* (January/February 2006).
- [8] I.P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S.P. Den Baars, J.S. Speck, U.K. Mishra. *J. Appl. Phys.*, **90**, 5196 (2001).
- [9] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zano, A. Tazzoli, M. Meneghini, E. Zanoni. *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.*, **8** (2), 332 (2008).
- [10] Abhitosh Vais. *Thesis for Erasmus Mundus Master Programme Nanoscience & Nanotechnology*, (Microwave Electronics Laboratory Department of Microtechnology & Nanoscience, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012).
- [11] G.K. Wachutka. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, **9** (11), 1141 (1990).
- [12] Jie Sun, H. Fatima, A. Koudymov, A. Chitnis, X. Hua, H.-M. Wang, J. Zhang, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **24** (6), 375 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Analysis of GaN HEMT parameters before and after gamma–neutron impact

E.A. Tarasova, S.V. Obolensky., O.E. Galkin, A.V. Hananova, A.B. Makarov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract A method for mathematical processing of the results AlGaIn/GaN HEMT of volt — capacitance characteristics measurements before and after gamma–neutron irradiation with fluence of $0.4 \cdot 10^{14}$ cm $^{-2}$ is proposed. The results of the modeling for AlGaIn/GaN HEMT on a SiC substrate are described. The error in calculating GaN HEMT parameters due to the error in calculating the electron distribution profile was observed.