### УДК 621.3.013.24

Николай Николаевич Ворсин<sup>1</sup>, Анатолий Антонович Гладыщук<sup>2</sup>, Татьяна Леонидовна Кушнер<sup>3</sup>, Николай Петрович Тарасюк<sup>4</sup>, Сергей Владимирович Чугунов<sup>5</sup> <sup>1</sup>канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики Брестского государственного технического университета <sup>2</sup>канд. физ.-мат. наук, проф. каф. физики Брестского государственного технического университета <sup>3</sup>канд. физ.-мат. наук, зав. каф. физики Брестского государственного технического университета <sup>4</sup>ст. преподаватель каф. физики Брестского государственного технического университета <sup>5</sup>ст. преподаватель каф. физики Брестского государственного технического университета Nikolai Vorsin<sup>1</sup>, Anatolii Gladyshchuk<sup>2</sup>, Tatiana Kushner<sup>3</sup>, Nikolai Tarasyuk<sup>4</sup>, Sergei Chugunov<sup>5</sup> <sup>1</sup>Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Department Physics of Brest State Technical University <sup>2</sup>Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of department Physics of Brest State Technical University <sup>3</sup>*Candidate of Physics and Mathematics, Head department Physics* of Brest State Technical University <sup>4</sup>Senior Lecturer of Department Physics of Brest State Technical University <sup>5</sup>Senior Lecturer of Department Physics of Brest State Technical University e-mail: vorsin@hotmail.com

### ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОГО ПЛОСКОГО ВИТКА ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В НИТРИДНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ

Описаны результаты исследований, проведенных при построении вихретокового измерителя электропроводности двумерного электронного газа в нитридных гетеропереходах. В основу измерителя положены две идеи: использование в качестве зонда широкого плоского витка и специального автогенератора зондирующего тока, который сводит задачу измерения активной проводимости витка к измерению постоянного тока.

*Ключевые слова*: вихретоковое зондирование, двумерный электронный газ, поверхностное сопротивление, отрицательная электропроводность.

## Application of a Wide Flat Loop for Vortex Probing of Two-Dimensional Electronic Gas in Nitride Heterojunctions

The results of studies carried out in the construction of an eddy current meter of electrical conductivity of a two-dimensional electron gas in nitride heterojunctions are described. The meter is based on two ideas: the use of a wide flat loop as a probe and a special probe current auto alternator, which reduces the task of measuring the active conductivity of a loop to measuring a direct current.

Key words: Eddy current sensing, 2D electron gas, surface resistance, negative conductivity.

#### Введение

Вихретоковое зондирование, занимающее существенное место в системах неразрушающего контроля, дает хорошие результаты только на объектах из материалов с высокой электропроводностью – металлы, сильно легированные полупроводники, насыщенные электролиты. С уменьшением электропроводности объекта зондирования вихретоковый отклик ослабевает и теряется в шумах индикаторного устройства. В какой-то мере работоспособность метода можно восстановить улучшением чувствительности индикаторного устройства и увеличением частоты зондирующего тока. Однако возможности этих способов ограничены и требуют применения дополнительных мер. В настоящей работе приведены результаты попыток расширения диапазона вихретокового зондирования в область слабой электропроводности, характерной для двумерного эдектронного газа (ДЭГ) в квантовой яме гетероперехода. Задача расширения диапазона возникла при построении прибора экспресс-контроля выращиваемых гетеропереходов GaN-AlGaN для создания СВЧ-транзисторов.

### Широковитковый датчик

Удельное сопротивление ДЭГ в нитридных гетеропереходах может находиться в диапазоне от 100 Ом/□ до 1000 Ом/□ (Ом на квадрат), в зависимости от примененных материалов и технологий. Обычный вихретоковый датчик накладного типа в виде проволочного витка создает достаточный сигнал только в низкоомной части диапазона – до 100 Ом/□. В высокоомной области диапазона, особенно в верхней его части, сигнал датчика оказывается очень слабым и не ощущается индикаторным устройством. Идея расширения диапазона удовлетворительной работы датчика заключается в расширении создаваемой им кольцевой токовой полосы на зондируемой пленке. При этом должна увеличиться поглощаемая пленкой электромагнитная мощность в сравнении с обычным тонким витком и, следовательно, величина реакции датчика. Следует заметить, что такие проблемы в [1; 2] пытаются решить другим путем – за счет улучшения чувствительности индикаторного устройства, но возможности этого способа сильно ограничены.

Теоретический анализ процесса вихретокового зондирования осуществляется разбиением зондируемой области на множество кольцевых зон, каждая их которых объявляется тонким контуром, в пределах которого плотность тока считается неизменной. Сам возбуждающий виток при таком анализе также считается тонким контуром. Все эти контуры связаны между собой и возбуждающим витком магнитной связью, что описывается системой линейных уравнений для комплексных амплитуд токов в контурах и витке. Коэффициентами в уравнениях являются собственные и взаимные индуктивности контуров, которые предварительно вычисляются по известным формулам [3]:

$$M_{pk} = \frac{\mu_0}{4\pi} \bigoplus_{pk} \frac{dl_p dl_k}{a},\tag{1}$$

где  $dl_p$ ,  $dl_k$  – элементы p-го и k-го контуров, а – расстояние между этими элементами. Интегрирование проводится по обоим контурам. Эта же формула используется для вычисления собственной индуктивности контура, толщина которого в этом случае считается конечной (толстый контур). Индуктивность принимается равной взаимной индуктивности двух бесконечно тонких контуров, из которых первый проходит по осевой линии, а второй – по внутренней границе «толстого» контура [3].

Переход к широкому витку в данной схеме анализа означает необходимость дробления на кольцевые зоны не только зондируемой поверхности, но и самого витка. Это приведет к увеличению числа уравнений и неизвестных, что выльется всего лишь

в увеличение времени решения и расходования памяти компьютера. Результатом решения является не только распределение тока в зондируемой поверхности, но и распределение тока в возбуждающем витке. Кроме того, определятся макроскопические параметры, такие как индуктивность возбуждающего витка и его колебательная добротность с учетом потерь энергии колебаний в активном сопротивлении витка и зондируемой поверхности. Следует заметить, что при вихретоковом зондировании одним из основных параметров датчика является относительное изменение колебательной добротности витков в результате их связи с зондируемым объектом – Q<sub>0</sub>/Q.

На рисунке 1 изображена постановочная часть задачи.



Рисунок 1. – Обозначения в расчетах параметров широкого витка

Виток характеризуется внутренним –  $R_1$ , внешним –  $R_2$  радиусами, d – толщиной фольги, из которой он изготовлен, и  $\rho$  – удельным сопротивлением материала витка. Заданными также являются расстояние до резистивной поверхности – h и ее удельное сопротивление –  $\delta$  в Ом/ $\Box$ . Составление и решение системы уравнений осуществлялось в системе МЭПЛ, которая является плохим инструментом по быстродействию, но хороша по краткости текста программы и наглядности представления результатов.

На рисунке 2 приведен результат такого расчета для частоты 400 МГц,  $R_1 = 5$  мм,  $R_2 = 10$  мм, h = 0.15 мм, d = 0.05 мм,  $\rho = 1.7 * 10^{-8}$  Ом\*м (медь) и  $\delta = 200$  Ом/ $\Box$ . График выражает в относительных единицах зависимость плотности тока в поверхности от номера, выделяемого на ней контура – кольцевой зоны. Видно, что непосредственно под витком плотность тока имеет максимум, который по ширине приблизительно совпадает с шириной витка.

Следовательно, увеличивая ширину витка, можно увеличить ширину токовой полосы в резистивной поверхности под ним и увеличить вклад этой поверхности в потери электромагнитной мощности витка.

Убедиться в этом можно, проводя расчет макроскопических параметров витка для неизменного среднего диаметра и расстояния до резистивной поверхности. При указанных выше характеристиках витка эти параметры на частоте 400 МГц равны:  $Q_0 = 976$ , L = 16 нГн, Q = 50,3,  $Q_0/Q = 25$ . Аналогичный расчет для витка с R<sub>1</sub> = 6,5, R<sub>2</sub> = 7,5, т. е. миллиметровой ширины дает  $Q_0 = 416$ , L = 29 нГн, Q = 63,  $Q_0/Q = 6,6$ . Таким образом, применение широкого витка позволяет улучшить показатель относительного изменения добротности более чем в 3,8 раза. Многочисленные эксперименты с витками разного сечения и ширины подтверждают этот вывод.



Рисунок 2. – Зависимость относительной плотности вихревого тока от номера кольцевой зоны

Имея механизм расчета, вносимого в виток активного сопротивления, можно рассчитать зависимость его величины от удельного сопротивления проводящей пленки под витком и получить формулу вычисления ее удельного сопротивления. На рисунке 3 показан график этой зависимости для частоты тока 400 МГц. Конечно, линейный вид этого графика можно предсказать заранее, поскольку все процессы в витке и проводящей поверхности под ним строго линейны. Интерес представляет только коэффициент пропорциональности между удельным и вносимым сопротивлением. Очевидно, этот коэффициент является функцией расстояния от витка до плоскости. Показанный на рисунке 3 график построен для расстояния 0,15 мм, а коэффициент, соответствующий этому расстоянию, равен k = 7,5.



Рисунок 3. – График зависимости величины вносимого в виток сопротивления от удельного сопротивления поверхности

Не составляет труда определить зависимость коэффициента пропорциональности от расстояния между витком и проводящей плоскостью. Разумеется, расчеты проводятся для выбранных размеров витка.

На рисунке 4 приведен график этой зависимости. Можно было ожидать, что величина коэффициента пропорциональности будет выражаться квадратичной зависимостью от расстояния до проводящей плоскости. Однако для использованного интервала расстояний 0–1 мм зависимость близка к линейной и аппроксимируется формулой

$$k = 7, 4 + 3,94h(MM). \tag{2}$$

Данная формула используется для расчета измеряемого удельного сопротивления –  $\rho.$ 



Рисунок 4. – Зависимость вносимой в виток проводимости от расстояния до поверхности, практически, линейная

### Индикаторное устройство

Малогабаритность и относительная простота прибора во многом обеспечена удачным выбором основы индикаторного устройства, которая свела задачу измерения вносимого в виток активного сопротивления к измерению постоянного тока с последующей оцифровкой результата и простым вычислением.

Использован двухтранзисторный генератор электрических колебаний, функциональная схема которого показана на рисунке 5. Генератор создает гармонический ток в индикаторном витке L и одновременно является измерителем его активного сопротивления. Частота генерируемых колебаний (около 400 МГц) определяется резонатором из сосредоточенных элементов L = 16 нГн и C = 10 пф.

Источник питающего тока создает через транзисторы ток I, не зависящий от напряжений на электродах транзисторов. Первый транзистор T1 включен по схеме с общей базой (ОБ), второй – T2 – по схеме с общим коллектором. Оба каскада не инвертируют сигнал при усилении, поэтому обратная связь (ОС), образованная соединением эмиттеров, будет положительной, и в контуре могут возникнуть незатухающие колебания на частоте резонанса. К особенности данного генератора следует отнести нулевую величину постоянного напряжения между базой и коллектором каждого транзистора. Кремниевые дрейфовые транзисторы сохраняют в таком режиме усилительные характеристики. Второй весьма важной особенностью рассматриваемого генератора является целостность резонатора – колебательного контура, в котором нет дробления реактивных элементов L и C.



Рисунок 5. – Структурная схема измерительного автогенератора

Для определения измерительных характеристик генератора удобно использовать концепцию отрицательного сопротивления (или проводимости). Мысленно заменим резонатор, включенный между точками А и В, источником постоянного напряжения U и вычислим зависимость от него тока I, отдаваемого этим источником в двухтранзисторную цепочку. В результате получается весьма громоздкая формула, график которой показан на рисунке 6.



Рисунок 6. – ВАХ транзисторной цепочки измерительного автогенератора

Видно, что в диапазоне напряжения от -0,06В до +0,06В исследуемая двухтранзисторная цепочка обладает отрицательной дифференциальной проводимостью. Величина проводимости в рабочей точке U = 0 выражается следующей формулой:

$$g = \frac{dI}{dU} = \frac{I}{4U_T} (1 - 2\alpha) + \frac{I_{e0}}{2U_T} (1 - 2\alpha) + \frac{I_{c0}}{U_T} (2 - \alpha),$$
(3)

в которой I – ток, задаваемый источником питания,  $U_T$  – температурный потенциал, равный при комнатной температуре 26 мВ,  $\alpha$  – коэффициент передачи в коллектор эмиттерного тока используемых транзисторов – величина, близкая к 1,  $I_{e0}$  и  $I_{c0}$  – обратные токи

соответственно эмиттерного и коллекторного переходов. Два последних слагаемых в данной формуле можно отбросить, ввиду того что обратные токи переходов транзисторов на несколько порядков меньше тока питания I. Первое слагаемое определяет отрицательную проводимость, которую можно записать очень простой формулой:

$$g_{-} \approx -\frac{I}{4U_{T}}.$$
(4)

Формула для отрицательной проводимости g-, создаваемой двухтранзисторной цепочкой, указывает на очень эффективный инструмент регулирования величины отрицательной проводимости. Действительно, ток питания I можно задавать и изменять в очень широких пределах – от долей микроампера до десятков миллиампер (примерно на 5 порядков) в тех же пределах, т. е. на 5 порядков будет изменяться величина отрицательной проводимости, создаваемой цепочкой на зажимах резонатора.

Если отрицательная проводимость по модулю превысит положительную проводимость подключенного к ней резонатора, то в нем возникнут колебания с резонансной частотой и нарастающей амплитудой. При росте амплитуды рабочая точка на графике ВАХ будет заходить в области с нулевой проводимостью (±0,16В на графике ВАХ), что уменьшит среднюю величину модуля отрицательной проводимости. Если эта средняя величина по-прежнему будет превышать положительную проводимость колебательного контура, рост амплитуды колебаний продолжится. Начиная с амплитуды 0,18 В рабочая точка на графике ВАХ будет заходить на участки положительной проводимости, что приведет к резкому уменьшению средней величины модуля отрицательной проводимости, мости. В конце концов средняя величина модуля отрицательной проводимости сравняется с положительной проводимостью колебательного контура и рост амплитуды колебаний в нем прекратится. Цепь будет вырабатывать колебания с постоянной равновесной амплитудой.

Описанный механизм стабилизации амплитуды колебаний может использоваться на практике, если заведомо известны параметры резонатора, по которым можно определить требуемую величину отрицательной проводимости и требуемый ток питания I. В случае построения измерительного генератора параметры колебательного контура заранее не известны и могут варьироваться в широких пределах.

В этом случае необходим автоматический подбор тока I под параметры подключенного резонатора. Реализация такой автоматики не представляет трудности, а принцип ее работы состоит в том, чтобы измерять амплитуду вырабатываемых колебаний и автоматически устанавливать такую величину тока питания I, при которой эта амплитуда составит заданную величину (в нашем случае 2 мВ). При этом величина постоянного тока питания легко измеряется, и по ней с помощью (4) вычисляется отрицательная проводимость, создаваемая транзисторной цепочкой. Модуль этой проводимости равен проводимости активных потерь резонатора, которая легко пересчитывается (2) в величину поверхностного удельного сопротивления ДЭГ в исследуемой подложке.

### Конструкция измерителя

Идея применения широкого витка и описанного индикаторного устройства была использована для построения бесконтактного измерителя удельного сопротивления ДЭГ, который образуется в квантовой яме гетероперехода GaN-AlGaN. Конструкция прибора показана на рисунке 7.



Рисунок 7. – Внешний вид измерителя

Он позволяет измерять удельное сопротивление проводящей поверхности в диапазоне 20–600 Ом/п. Измерительная часть представляет собой цилиндрический столик диаметром 95 мм и высотой 5 мм. В центре верхнего основания расположен плоский виток. На наклонной поверхности корпуса расположен цифровой индикатор, отображающий измеряемую величину в Ом/п. Подложка, содержащая исследуемый гетеропереход, просто укладывается на верхнюю поверхность столика, которая имеет хорошую плоскостность и чистоту обработки. При этом без всякой задержки на цифровом индикаторе отображается значение удельного поверхностного сопротивления ДЭГ. Прибор может соединяться с компьютером через USB-порт. После запуска на компьютере соответствующей программы показания прибора дублируются на мониторе и могут сохраняться в текстовом файле при нажатии кнопки «Запомнить». Кроме того, имеется возможность прописать толщину подложки, которая влияет на результат измерений (2). По умолчанию толщина подложки полагается равной 400 мкм.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стеблев, Ю. И. Синтез заданных характеристик вихретоковых преобразователей / Ю. И. Стеблев // Дефектоскопия. – 1984. – № 11. – С. 12–20.

2. Fava, J. Design and construction of eddy current sensors with rectangular planar coils / J. Fava, A. E. Obrutsky, M. Ruch // 16 the World Conf. On Non-Destr. Testing. – Montreal, 2004. - P.34-46.

3. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей : справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

#### REFERENCES

1. Stiebliev, Yu. I. Sintez zadannykh kharaktieristik vikhrietokovykh prieobrazovatieliej / Yu. I. Stiebliev // Diefiektoskopija. – 1984. – № 11. – S. 12–20.

2. Fava, J. Design and construction of eddy current sensors with rectangular planar coils / J. Fava., A. E. Obrutsky, M. Ruch // 16 the World Conf. On Non-Destr. Testing. – Montreal, 2004. - P. 34-46.

3. Kalantarov, P. L. Raschiot induktivnostiej : sprav. kn. / P. L. Kalantarov, L. A. Zeitlin. – L. : Energoatomizdat, 1986. – 488 s.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 08.09.2021