

УДК 621.3.013.24

**Николай Николаевич Ворсин¹, Анатолий Антонович Гладышук²,
Татьяна Леонидовна Кушнер³, Николай Петрович Тарасюк⁴,
Сергей Владимирович Чугунов⁵**

¹канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики

Брестского государственного технического университета

²канд. физ.-мат. наук, проф. каф. физики

Брестского государственного технического университета

³канд. физ.-мат. наук, зав. каф. физики

Брестского государственного технического университета

⁴ст. преподаватель каф. физики

Брестского государственного технического университета

⁵ст. преподаватель каф. физики

Брестского государственного технического университета

**Nikolai Vorsin¹, Anatolii Gladyschuk², Tatiana Kushner³, Nikolai Tarasyuk⁴,
Sergei Chugunov⁵**

¹Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Department Physics
of Brest State Technical University

²Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of department Physics
of Brest State Technical University

³Candidate of Physics and Mathematics, Head department Physics
of Brest State Technical University

⁴Senior Lecturer of Department Physics of Brest State Technical University

⁵Senior Lecturer of Department Physics of Brest State Technical University
[e-mail: vorsin@hotmail.com](mailto: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 электронного газа (ДЭГ) в квантовой яме гетероперехода. Задача расширения диапазона возникла при построении прибора экспресс-контроля выращиваемых гетеропереходов GaN-AlGaIn 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 проводочного 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 из которых является 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]:

$$M_{pk} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{pk} \frac{d\vec{l}_p d\vec{l}_k}{a}, \quad (1)$$

где $d\vec{l}_p$, $d\vec{l}_k$ – элементы p -го и k -го контуров, a – 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, определяются 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_0/Q .

На рисунке 1 изображена постановочная часть задачи.

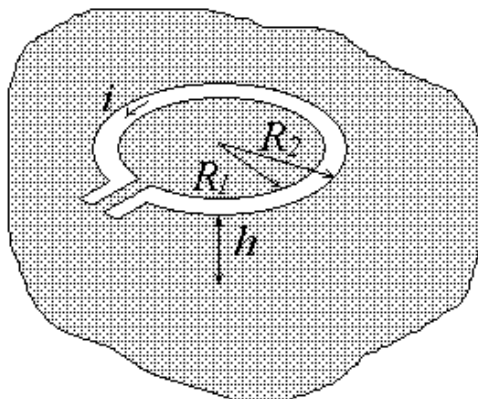


Рисунок 1. – Обозначения в расчетах параметров широкого витка

Виток характеризуется внутренним – R_1 , внешним – R_2 радиусами, d – толщиной фольги, из которой он изготовлен, и ρ – удельным сопротивлением материала витка. Заданными также являются расстояние до резистивной поверхности – h и ее удельное сопротивление – δ в Ом/□. 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, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом*м (медь) и $\delta = 200$ Ом/□. 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 $R_1 = 6,5$, $R_2 = 7,5$, 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.

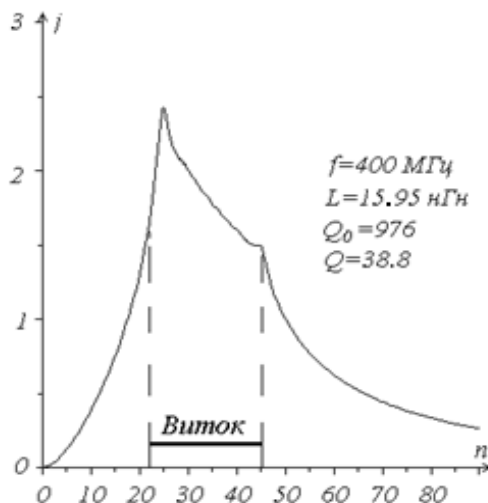


Рисунок 2. – Зависимость относительной плотности вихревого тока от номера кольцевой зоны

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 $k = 7,5$.

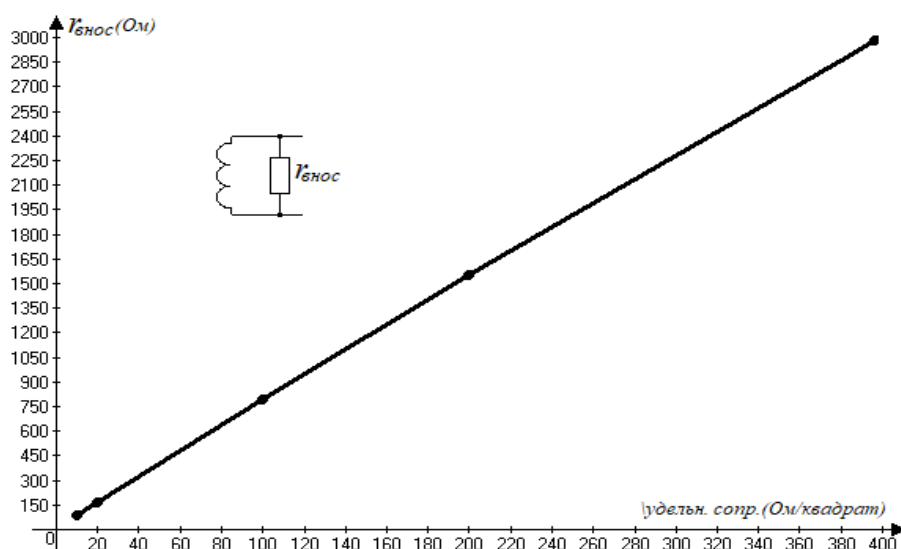


Рисунок 3. – График зависимости величины вносимого в виток сопротивления от удельного сопротивления поверхности

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

$$k = 7,4 + 3,94h(\text{мм}). \quad (2)$$

Данная формула используется для расчета измеряемого удельного сопротивления – ρ .

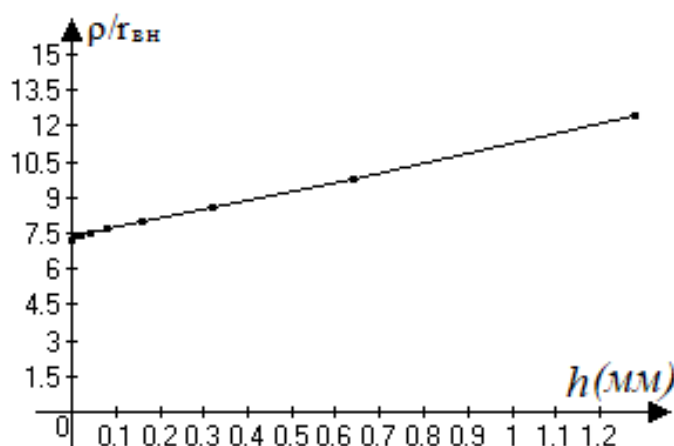


Рисунок 4. – Зависимость вносимой в виток проводимости от расстояния до поверхности, практически, линейная

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 Т1 включен по схеме с общей базой (ОБ), второй – Т2 – 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 .

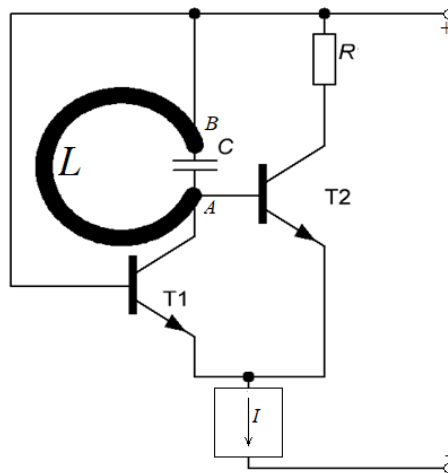


Рисунок 5. – Структурная схема измерительного автогенератора

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.

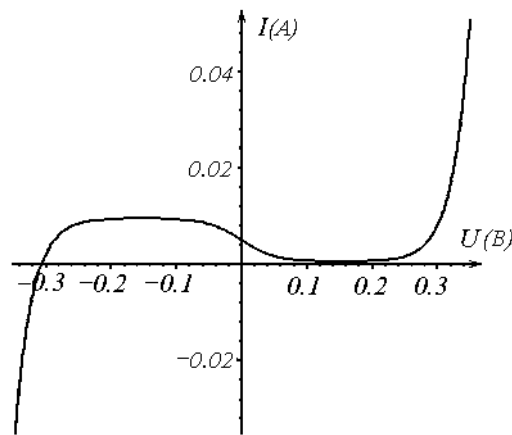


Рисунок 6. – ВАХ транзисторной цепочки измерительного автогенератора

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

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

в которой I – ток, задаваемый источником питания, U_T – температурный потенциал, равный при комнатной температуре 26 мВ , α – 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:

$$g_- \approx -\frac{I}{4U_T}. \quad (4)$$

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 ($\pm 0,16$ В 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. 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-AlGaIn. Конструкция прибора показана на рисунке 7.

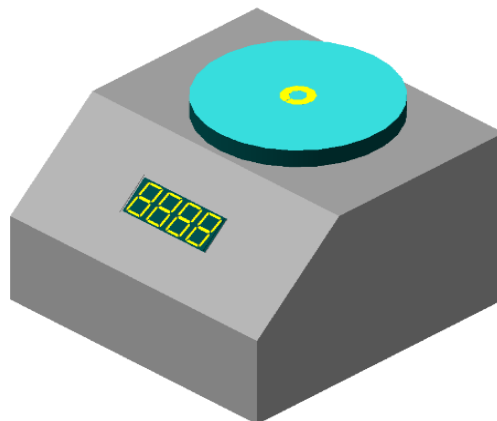


Рисунок 7. – Внешний вид измерителя

Он позволяет измерять удельное сопротивление проводящей поверхности в диапазоне 20–600 Ом/□. 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/□. 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 kharakteristik 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 наступіў у рэдакцыю 08.09.2021