



ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., СЛИПЧЕНКО Н.И.,
ПЕТРОВ В.В.

Выполняется количественное исследование вклада в пространственную разрешающую способность различных компонент электромагнитного поля коаксиального резонаторного измерительного преобразователя при ближнеполевой микроволновой микроскопии полупроводниковых материалов. Приводятся зависимости, позволяющие прогнозировать изменения чувствительности измерительного преобразователя и ее порога как по пространственному разрешению, так и по величине неоднородности параметров

1. Введение

Чувствительность резонаторных измерительных преобразователей (РИП), используемых в СВЧ диагностике функциональных материалов, определяется степенью включения исследуемого образца в поле резонатора. При этом результатом измерения являются усредненные по объему включения значения электрофизических параметров.

В микроволновой микроскопии, основной задачей которой является определение пространственного распределения и величины неоднородности электрофизических параметров образца, остро стоит вопрос о пространственной разрешающей способности и парциальной чувствительности, которая определяется степенью включения неоднородности в поле РИП. Остальные части объема образца только нагружают РИП, снижая его добротность и, как следствие, чувствительность.

Локализация зондирующего СВЧ поля на неоднородности осуществляется благодаря использованию резонансных щелей в волноводах [1], апертур конических волноводов [2] либо коаксиальных резонаторных измерительных преобразователей (КРИП) с центральным проводником, который имеет существенно заостренную форму в области взаимодействия с образцом [3].

Физический анализ электродинамической системы «КРИП-образец» показывает, что пространственная разрешающая способность определяется участком РИП, осуществляющим ближнеполевое взаимодействие с неоднородностью, в то время как остальная часть РИП реализует паразитное волновое взаимодействие [4].

В работе [5] приведена модель взаимодействия резонаторного зонда с диэлектрическим образцом. При теоретическом описании использованы следующие приближения: острие центрального проводника коаксиала представлено в виде проводящей сферы, взаимодействие датчика с образцом принято квазистатическим. Очевидно, что полученные таким образом результаты могут быть верны только приближенно.

В работе [6] зонд представлен в виде бесконечно малого диполя. Такая модель позволила провести полный полевой анализ системы зонд-образец, однако при этом не учитывается взаимодействие объема СВЧ резонатора с образцом. Кроме того, в этой работе не рассмотрено влияние на компоненты поля электрофизических параметров исследуемого образца.

В работе [7] относительное изменение резонансной частоты системы «резонатор-зонд» вблизи анизотропного диэлектрического образца рассчитывалось методом теории возмущений – малый участок взаимодействия зонда с образцом представлялся элементом емкостной связи объема резонатора с исследуемым диэлектриком. Электрическое поле в системе получено путем численного решения уравнений Максвелла в статическом приближении при условии, что размер острия зонда и расстояние зонд-образец намного меньше длины волны. Модель зонда представляла собой цилиндр, переходящий в конус и завершающийся сферической поверхностью. Полученные авторами результаты говорят о том, что уменьшение радиуса зонда приводит к возрастанию соотношения компонент электрического поля E_{\perp}/E_{\parallel} .

Целью данной статьи является проведение количественных исследований вклада в пространственную разрешающую способность различных компонент электромагнитного поля КРИП при ближнеполевой микроволновой микроскопии полупроводниковых материалов. Для достижения этой цели решены следующие задачи: рассмотрены с позиции общих положений теории СВЧ диагностики материалов зависимости нормальной и тангенциальной составляющих электрического поля СВЧ колебаний КРИП в области ближнеполевого взаимодействия с образцом и их соотношения от ее геометрии и параметров образца; получены зависимости, позволяющие прогнозировать изменения чувствительности микроскопа и ее порога как по пространственному разрешению, так и по величине неоднородности параметров.

2. Основные физические положения

Для обеспечения максимальной чувствительности сигналов измерительной информации к локальным неоднородностям необходимо концентрировать поле с той локальностью, которая определяется требуемым пространственным разрешением. В случае КРИП для микроволновой микроскопии в первом приближении следует ожидать уменьшения чувствительности к неоднородности электрофизических параметров полупроводникового образца при уменьшении радиуса острия центрального проводника в области ближне-

полевого взаимодействия, т.е. при стремлении улучшить порог пространственного разрешения будет ухудшаться порог электрофизического разрешения. Попытка [8] снять это противоречие заменой КРИП объемным РИП с резонансной коаксиальной апертурой может иметь перспективу, если более точно уяснить электродинамическую природу ближнеполевого взаимодействия в такой структуре.

В общем случае коаксиальной апертуры РИП сигналы измерительной информации образуются в соответствии со следующими соотношениями:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\int_{V_{\text{ОБР}}} \varepsilon(r, \varphi, z) (E_z^2 + E_r^2) dV}{\int_V (E_z^2 + E_r^2) dV} + \frac{\int_{V_{\text{РЕЗ}}} (E_z^2 + E_r^2) dV}{\int_V (E_z^2 + E_r^2) dV} - \frac{\int_{V_{\text{БИ}}} (E_{z_0}^2 + E_{r_0}^2) dV}{\int_V (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{\int_V (E_z^2 + E_r^2) dV}{P_{\text{СТ}} + \int_{V_{\text{ОБР}}} \sigma (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (2)$$

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\int_{V_{\text{БИ}}} \delta \varepsilon E_z^2 dV + \int_{V_{\text{ОБР}}} \varepsilon \delta (E_z^2 + E_r^2) dV}{\int_V (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (3)$$

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\int_{V_{\text{БИ}}} \delta \sigma E_z^2 dV + \int_{V_{\text{ОБР}}} \sigma \delta (E_z^2 + E_r^2) dV}{P_{\text{СТ}} + \int_{V_{\text{ОБР}}} \sigma (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (4)$$

где $\Delta f/f$ и $\delta Q/Q$ – изменения резонансной частоты и добротности РИП, связанные с внесением образца с комплексной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg \delta)$ в область взаимодействия РИП; V – полный объем РИП с образцом; $V_{\text{ОБР}}$ – объем образца; $V_{\text{БИ}}$ – объем области ближнеполевого взаимодействия; $\delta(E_z^2 + E_r^2)$ – изменение распределения поля, обусловленное неоднородностями $\delta\varepsilon$ и $\delta\sigma$ в области ближнеполевого взаимодействия.

Область взаимодействия $V_{\text{ОБР}}$ охватывает весь объем образца, включаемый в СВЧ поле РИП. Область ближнеполевого взаимодействия $V_{\text{БИ}}$ существенно меньше области общего взаимодействия $V_{\text{вз}}$ и определяет порог пространственной разрешающей способности микроволновой микроскопии.

В числителях (1), (3) выделены два слагаемых, которые физически неравноценны. Первое описывает прямое энергетическое воздействие $\tilde{\varepsilon}$ на параметры $f_{\text{рез}}$ и Q резонатора, второе – через изменение распределения поля колебаний, вызванное $\tilde{\varepsilon}$. Обычно вторым слагаемым пренебрегают. Однако такое приближение справедливо только в рамках малых возмущений. В нашем рассмотрении целесообразно его не допускать.

Области ближнеполевого $V_{\text{БИ}}$ и общего волнового взаимодействия в (1) и (2) не разделены. Разделение их может проявиться только через пространственную зависимость компонент электрического поля E_z и E_r . Физически совершенно очевидно, что следует ожидать более сильной локализации E_z в области острия центрального проводника.

Пространственная неоднородность электрофизических свойств проявляется в первую очередь через взаимодействие с E_z -компонентой. Взаимодействие с E_r -компонентой скорее интегральное для всех неоднородностей в области включения образца в общее поле РИП.

В целом соотношения (1) – (4) иллюстрируют эти соображения качественно. Для количественной оценки необходимо исследовать влияние геометрии РИП и параметров образца детально. В работе такие количественные исследования проведены численным способом с использованием конечно-элементного решения уравнения Гельмгольца для электродинамической системы, геометрия которой изображена на вставке рис. 1. Заметим, что для таких исследований еще не существенна форма острия, поэтому она выбрана предельно простой. Уточнения ее потребуются после вскрытия основных закономерностей.

3. Модель электродинамической системы «резонатор-образец»

Исследуемая электродинамическая система представляет собой четвертьволновый коаксиальный резонатор, находящийся в контакте с образцом – диэлектриком с потерями, который характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg \delta)$. Из физических соображений очевидно, что полученные результаты будут справедливы и для случая многослойной системы, в том числе при наличии зазора между резонатором и образцом.

Численное исследование выполнялось путем решения методом конечных элементов задачи на собственные значения для уравнения Гельмгольца в области, изображенной на вставке к рис. 1 (1 – область резонатора, 2 – область ближнеполевого взаимодействия, 3 – основной объем образца). Далее для ТЕМ моды определялись распределения компонент поля в образце при различных его электрофизических параметрах. Радиальное распределение определялось на глубине, равной половине толщины образца, вертикальное – на оси симметрии системы в направлении от зонда вглубь образца. Интегралы от квадратов компонент поля вычислялись по всему объему исследуемого образца.

4. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены распределения E_r -компоненты по радиусу области взаимодействия для $b/\lambda = 0,15$; $a/b = 0,1$; $\lambda = 3$ см. Образец взят толщиной $h/\lambda = 0,2$

и экранирован с обратной стороны. Распределения исследовались на глубине $h/\lambda = 0,1$. Качественно это распределение соответствует известному из литературы и отражает факт локализации E_r за область ближнеполевого взаимодействия ($r/\lambda > 0,01$).

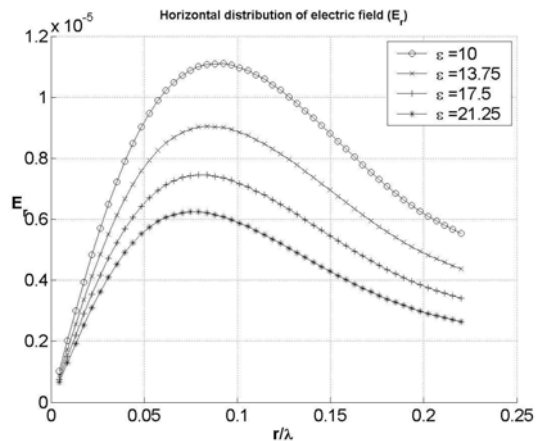


Рис. 1. Горизонтальное распределение нормальной компоненты

Представленные на рис. 2 распределения отношения E_z/E_r по радиусу убедительно свидетельствуют о локализации E_z -компоненты в области ближнеполевого взаимодействия ($r/\lambda < 0,02$) и о существенном ее преобладании над E_r -компонентой.

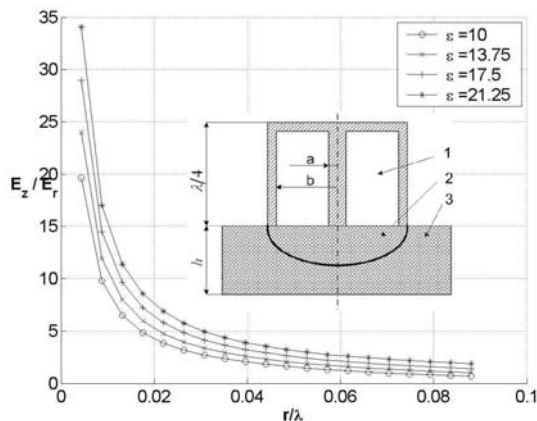


Рис. 2. Горизонтальное распределение отношения компонент

Вертикальное (по z) распределение E_z при $r=0$ представлено на рис. 3, 4 и показывает наличие существенной зависимости E_z -компоненты от $\text{tg } \delta$ образца. Качественно полученные зависимости от ε и $\text{tg } \delta$ обеих компонент укладываются в общее представление о зависимости вносимой образцом емкости от его параметров.

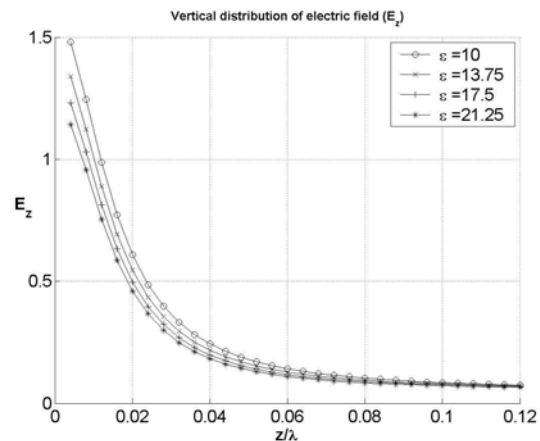


Рис. 3. Вертикальное распределение нормальной компоненты при различных ε

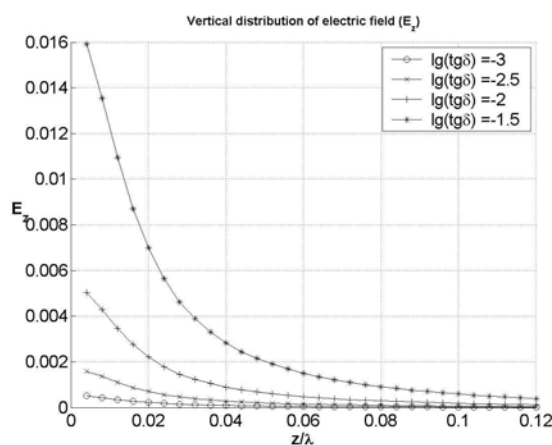


Рис. 4. Вертикальное распределение нормальной компоненты при различных $\text{tg } \delta$

Следующим этапом исследований было установление локализации компонент E_r и E_z в зависимости от соотношения внутреннего и внешнего радиусов коаксиальной апертуры РИП. Как видно из рис. 5, 6, локализация общего поля в области ближнеполевого взаимодействия усиливается с уменьшением a/b именно за счет компоненты E_z . Полученные зависимости без каких-либо физических допущений могут качественно и количественно масштабироваться в область $a/b < 0,05$.

Выполним оценку влияния особенности локализации поля на чувствительность и пространственную разрешающую способность РИП.

Исходя из соотношений (3), (4), можно качественно оценивать влияние локализации поля на пространственную разрешающую способность и пороги чувствительности по регистрации неоднородности $\delta\varepsilon$ и $\delta\sigma$. Для этого лучше оценивать зависимости интегралов от E_z компоненты поля.

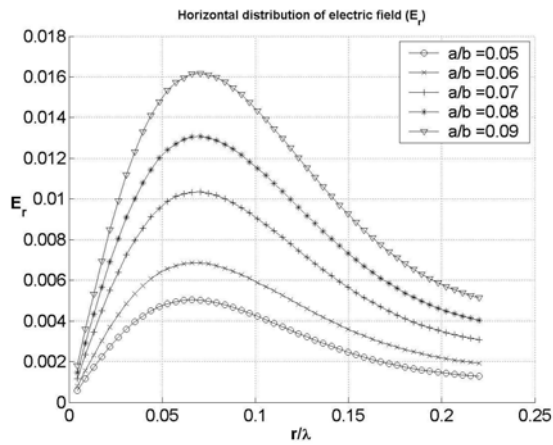


Рис. 5. Горизонтальное распределение тангенциальной компоненты при различных a/b

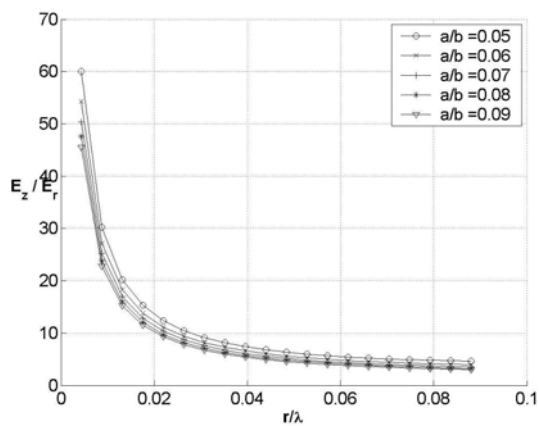


Рис. 6. Горизонтальное распределение отношения компонент при различных a/b

На рис. 7, 8 представлены соответствующие зависимости, которые убедительно свидетельствуют об улучшении указанных параметров РИП при уменьшении радиуса центрального проводника в области взаимодействия РИП с образцом. Из рис. 8 вытекает также одновременный рост чувствительности РИП к неоднородностям $\delta\epsilon$ и $\delta\sigma$ для образцов с более высокими значениями ϵ и $\text{tg } \delta$.

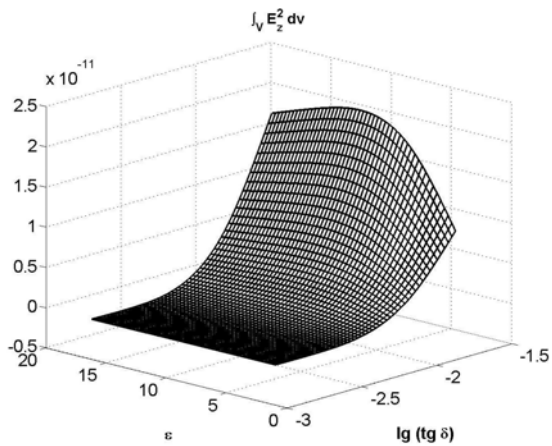


Рис. 7. Интеграл нормальной компоненты: зависимость от электрофизических параметров

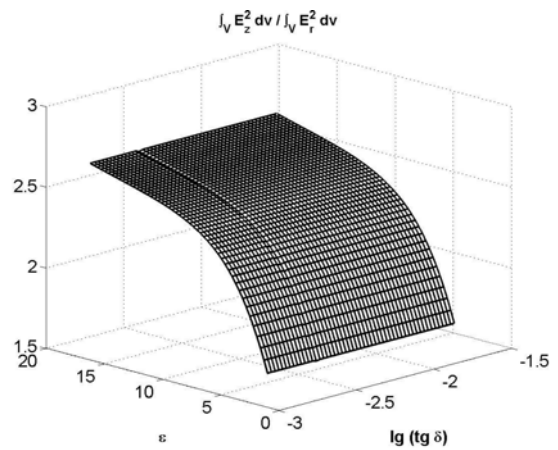


Рис. 8. Отношение интегралов компонент: зависимость от электрофизических параметров

Очень важными для оценки эффективности РИП такого типа для микроволновой микроскопии полупроводников являются зависимости, представленные на рис. 9, 10.

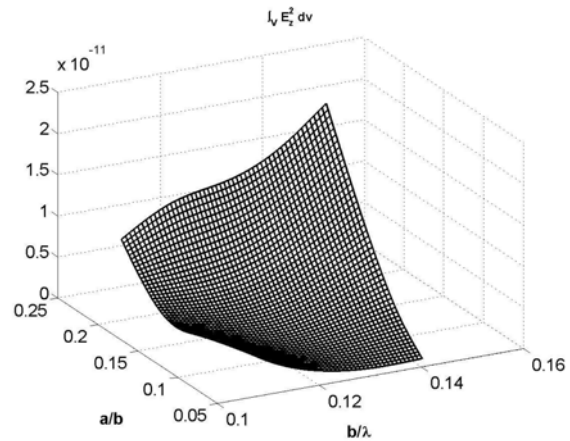


Рис. 9. Интеграл нормальной компоненты: зависимость от a/b

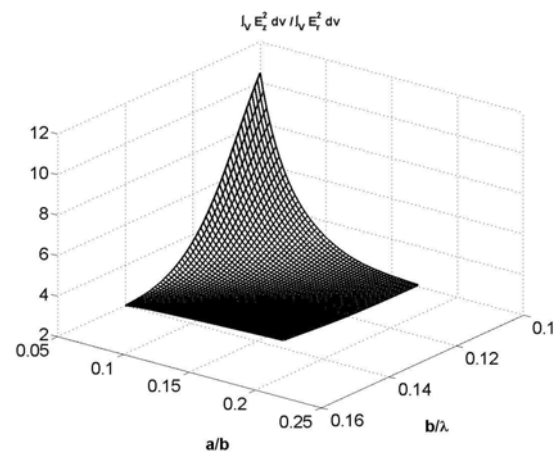


Рис. 10. Отношение интегралов компонент: зависимость от a/b

С учетом данных рис. 7, 8 указанные зависимости свидетельствуют о том, что с уменьшением a/b происходит энергетическая локализация поля в области ближнеполевого взаимодействия, а зависимость ее от $\text{tg } \delta$ образца практически отсутствует при сохранении зависимости от ε .

5. Выводы

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Выполнены численные исследования пространственных распределений нормальной (E_z) и тангенциальной (E_r) составляющих СВЧ электрического поля КРИП в области образца. Показано, что их локализация существенно различается, так же как и энергетические соотношения. Компонента E_z локализована в области центральной части зонда, E_r имеет максимум вблизи середины радиуса внешней части коаксиала.

Энергетически электрическое СВЧ поле по мере уменьшения радиуса центрального проводника в области образца концентрируется в нормальной компоненте, на порядок превышая энергию в тангенциальной компоненте. Этим и определяется ближнеполевое взаимодействие в микроволновой микроскопии с помощью КРИП.

2. Установлено, что нелокальное взаимодействие тангенциальной компоненты с образцом уменьшает добротность КРИП и снижает его чувствительность по неоднородности. Локальное взаимодействие нормальной компоненты, определяющее чувствительность микроволновой микроскопии, возрастает при уменьшении отношения радиусов центральной и внешней части коаксиала и непосредственно радиуса центрального проводника в области образца.

3. Установлено, что распределения компонент электрического СВЧ поля в объеме зависят от ε и $\text{tg } \delta$ образца, а энергетические соотношения зависят только от ε , возрастая с увеличением ε от 1 до 10 и далее насыщаясь.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные зависимости позволяют прогнозировать изменения чувствительности КРИП и ее порога как по пространственному разрешению, так и по величине неоднородности параметров.

Литература: 1. Golosovsky M., Davidov D. Nowel millimeter-wave near-field resistivity microscope // Applied Physics Letters. 1996. V. 68, No. 11. P. 1579-1581. 2. Nozokido T., Bae J., Mizuno K.. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2001. V. 49, No. 3. P. 491-499. 3. Wei T., Xiang X.-D., Wallace-Freedman W.G., Schultz P.G.. Scanning tip microwave near-field microscope // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68, No. 24. P. 3506-3508. 4. Гордиенко Ю.Е., Петров В.В., Хаммуд Ф.М. Оценка численно-аналитических моделей СВЧ резонаторных датчиков с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. 2005. №140. С. 156-162. 5. Gao G., Xiang X.-D.. Quantitative microwave near-field microscopy of dielectric properties. Review of Scientific Instruments. 1998. V. 69, No 11. P. 3846-3851. 6. Imtiaz A., Anlage S.. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of applied physics. 2006. 100. 7. Wang Y.G., Reeves M.E., Kim W.J., Horwitz J.S., Rachford F.J.. Uniaxial dielectric anisotropy in $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ films studied by evanescent-probe microscopy // Applied Physics Letters. 2001. V. 78, No. 24. P. 3872-3874. 8. Гордиенко Ю.Е. Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники // Нові технології. 2002. №1. С.3-6.

Поступила в редколлегию 14.09.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +38-057-702-13-62.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +38-057-702-10-13.

Петров Вячеслав Викторович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +38-057-702-13-62.