

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТРАП-ДЕТЕКТОРОВ

Д. Н. ТАТЬЯНКО, Ю. П. МАЧЕХИН, К. А. ЛУКИН

В работе представлены результаты экспериментальных исследований поляризационной зависимости тока 3-диодного аналога трап-детектора QED-100 и новой конструкции трап-детектора. Приведены результаты численного моделирования поляризационной зависимости трап-детекторов при идеальных условиях измерений и с учетом влияния условий проведения эксперимента и проведено их сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: трап-детектор, поляризация оптического излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Трап-детекторы оптического излучения являются детекторами, позволяющими проводить абсолютные измерения мощности оптического излучения. Квантовая эффективность трап-детекторов приближается к 100%. Впервые трап-детектор был предложен и описан Залевским и Дудой в 1983 году [1]. Эта модель состоит из четырех расположенных последовательно фотодиодов и выпускается промышленно под названием QED-100. Данная модель была запатентована Дудой в 1985 году [2]. Луч оптического источника, попадая на поверхности фотодиодов, частично поглощается, а оставшаяся энергия луча отражается. Отражаясь от каждого фотодиода в трап-детекторе, луч попадает на последующий фотодиод и, отразившись от последнего в цепочке фотодиода, направляется на предыдущий фотодиод, таким образом возвращаясь в систему фотодиодов. Токи от всех фотодиодов суммируются. В [3] показана более экономичная модель трап-детектора QED-100, предложенного Залевским и Дудой в 1983 году, состоящая из трех фотодиодов.

Благодаря многократному попаданию луча на фоточувствительные поверхности фотодиодов внутри трап-детектора, практически все оптическое излучение поглощается, следовательно, уменьшаются потери, связанные с отражением излучения от поверхности фотодиодов в структуре детектора и увеличивается значение внешней квантовой эффективности. Уменьшение потерь, вызванных отражением излучения, значительно улучшает линейность спектральной чувствительности трап-детектора по сравнению с отдельными фотодиодами [4-7].

Трап-детекторы оптического излучения являются высокоточными датчиками оптического излучения, но при этом результат измерений существенно зависит от различных факторов, например, от точности юстировки измерительной установки: угла вхождения луча в детектор, взаимного расположения фотодиодов внутри

детектора. Также в значительной мере результат измерений может зависеть от чувствительности фотодиодов детектора и от таких внешних факторов, как фоновое освещение и его неравномерность.

Целью данной работы является экспериментальное исследование и численное моделирование зависимости фототока трап-детекторов от поляризации входного излучения и влияния на данную зависимость условий проведения измерений.

1. ВЫБОР МОДЕЛЕЙ ТРАП-ДЕТЕКТОРОВ

Для уменьшения потерь, связанных с отражением излучения в рассмотренных выше фотодетекторах, предлагается новая модель трап-детектора [3, 8, 9], представленная на рис. 1, которая обеспечивает большее число переотражений луча в структуре детектора. Ближайшим существующим аналогом новой модели является 3-диодный трап-детектор QED-100 [3].

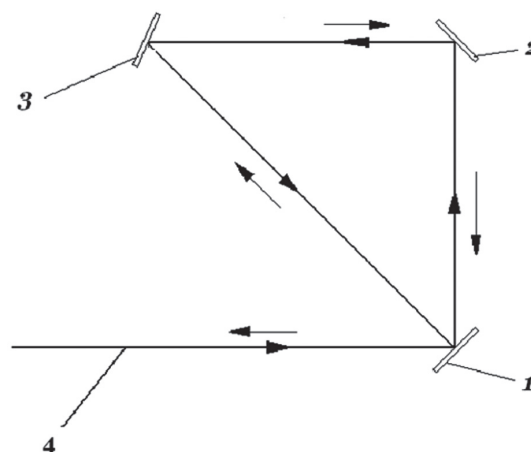


Рис. 1. Новая модель трап-детектора на базе трех фотодиодов

В предлагаемой новой конфигурации трап-детектора, построенной из трех фотодиодов (рис. 1), луч 4 падает на фотодиод 1 и далее отражается на фотодиоды 2 и 3. Фотодиод 3 отражает

луч не обратно на фотодиод 2, как в 3-диодном QED-100 и в других известных конфигурациях трап-детекторов, а отражает луч на фотодиод 1. Луч при этом падает на фотодиод 1 по нормали и затем возвращается обратно в систему фотодиодов, отражаясь от фотодиода 1 на фотодиод 3 и далее на фотодиоды 2 и 1. В результате число отражений увеличивается с 5 до 7 в схемах из трех фотодиодов. Таким образом, в классической схеме происходит $2N-1$ переотражение [7], а в предлагаемой схеме $2N+1$ переотражение, где N – число фотодиодов в трап-детекторе.

Новая конфигурация трап-детектора является поляризационно-зависимой, как и вариант, приведенный в [3] (детектор QED-100). Но за счет большего числа отражений увеличивается значение поглощенной мощности и, следовательно, уменьшается влияние поляризации на результат измерений.

В работе исследуется новая конструкция трап-детектора, а также детектор, являющийся аналогом QED-100, но состоящий из трех диодов, который рассматривается как наиболее подобный новой предлагаемой конструкции. В новой конструкции изменен только угол наклона третьего диода относительно оптической оси детектора, т.е. угол, под которым третий фотодиод расположен относительно падающего на него луча.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТРАП-ДЕТЕКТОРОВ В ИДЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Построена численная модель поляризационной зависимости трап-детектора для идеальных условий измерений, в соответствии с которой ток трап-детектора описывается выражением:

$$I = \sum_{i=1}^N \left(\frac{qn\lambda}{hc} \eta (1 - \rho_i) P_{i-1} \right), \quad (1)$$

где P_{i-1} – мощность падающего луча, ρ_i – коэффициент отражения от поверхности i -го фотодиода; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; e – элементарный заряд; n – коэффициент преломления воздуха; λ – длина волны излучения, падающего на фотодиод; η – внутренняя квантовая эффективность; i – порядковый номер отражения оптического луча в трап-детекторе; N – количество отражений оптического луча в трап-детекторе.

Параметром, зависящим от угла наклона плоскости поляризации оптического излучения падающего на фотодиоды трап-детектора является коэффициент отражения от поверхности фотодиода ρ_i , который определяет величину мощности излучения P_{i-1} , распространяющегося внутри трап-детектора.

В соответствии с численной моделью, на основании выражения (1), построена поляризационная зависимость тока трап-детектора при идеальных условиях измерений, результаты которой показаны на рис. 2. Смоделировано плоско-поляризованное оптическое излучение на входе трап-детектора и рассчитана зависимость фототока на выходе детектора от угла поворота плоскости поляризации подаваемого излучения. Полученные результаты хорошо соотносятся с результатами, представленными в работе [10, 11].

ско-поляризованное оптическое излучение на входе трап-детектора и рассчитана зависимость фототока на выходе детектора от угла поворота плоскости поляризации подаваемого излучения. Полученные результаты хорошо соотносятся с результатами, представленными в работе [10, 11].

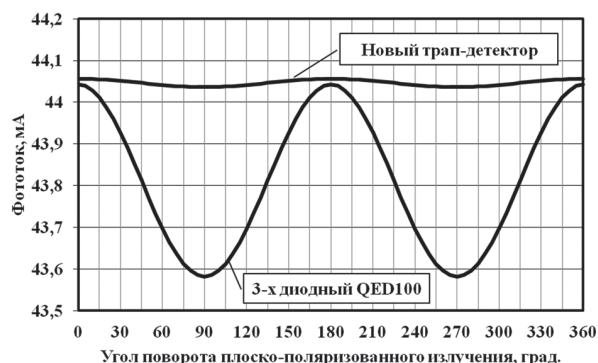


Рис. 2. Численная модель зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения различных конфигураций трап-детекторов

Результат моделирования зависимостей фототоков от угла поворота плоскости поляризации плоско-поляризованного излучения для исследуемых детекторов и фотодиодов их составляющих, при идеальных условиях измерений, представлены на рис. 3 и 4.

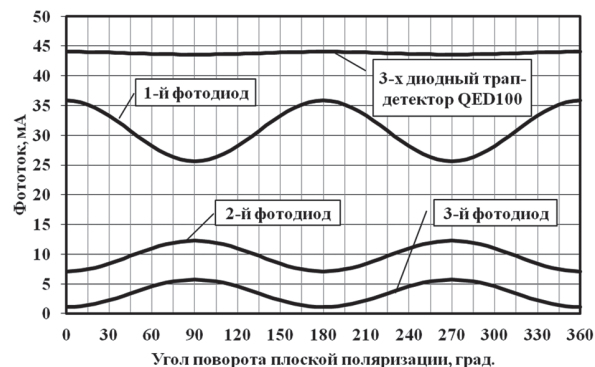


Рис. 3. Численная модель зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для 3-диодного аналога трап-детектора QED100 и составляющих его фотодиодов

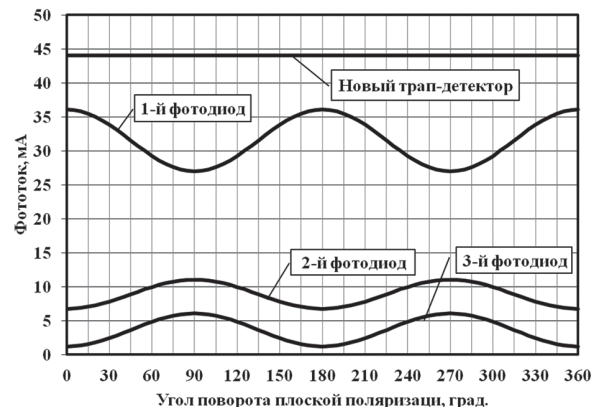


Рис. 4. Численная модель зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для нового трап-детектора и составляющих его фотодиодов

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАП-ДЕТЕКТОРОВ

Проведены экспериментальные исследования рассматриваемых моделей трап-детекторов, в которых измерена их поляризационная зависимость. На вход детекторов подавалось плоскополяризованное лазерное излучение. При этом плоскость поляризации вращалась в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

Изображение экспериментальной установки представлено на рис. 5. Излучение полупроводникового красного лазера направлялось на призму Глана, которая выделяла плоскополяризованную волну и далее поступало на полуволновую поляризационную пластину, вращая которую можно было поворачивать направление поляризации плоскополяризованного оптического излучения. Пройдя полуволновую поляризационную пластину, излучение направлялось через лепестковую диафрагму на вход трап-детектора, состоящего из трех фотодиодов ФД-24к, в которых были удалены защитные стекла для уменьшения потерь мощности на отражении от них излучения. Электрически фотодиоды были соединены параллельно, так, что токи на их выходах суммировались. Также была возможность измерять токи отдельных фотодиодов в составе трап-детектора.

При проведении эксперимента первый и второй фотодиоды были установлены неподвижно, а третий фотодиод был установлен на поворотном столе и поворачивался так, что образовывал с первым и вторым фотодиодами либо 3-диодную QED100 конфигурацию трап-детектора, либо предлагаемую новую конструкцию детектора.

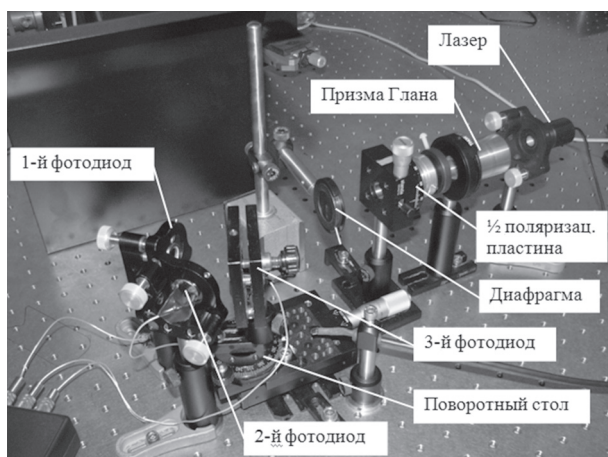


Рис. 5. Экспериментальная установка по исследованию спектральных характеристик трап-детекторов

В конструкции трап-детекторов использовались фотодиоды ФД-24к без стеклянного окна. Стеклянные окна были удалены, чтобы устранить отражения от них луча, т.е. все излучение попадало на активные поверхности фотодиодов.

Результаты эксперимента приведены на рис. 6 и 7.

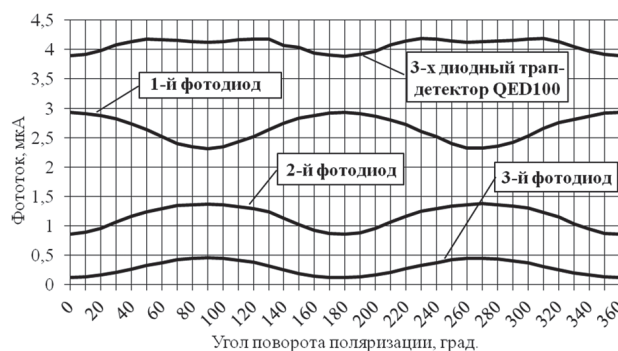


Рис. 6. Экспериментально полученные зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для 3-диодного аналога трап-детектора QED100 и составляющих его фотодиодов

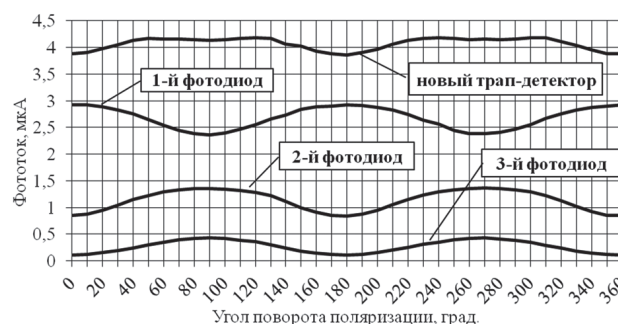


Рис. 7. Экспериментально полученные зависимости фототоков от угла поворота поляризации плоско-поляризованного излучения для новой конфигурации трап-детектора и составляющих его фотодиодов

Графики на рис. 3–4 и рис. 6–7 показывают, что формы кривых поляризационной зависимости тока отдельных фотодиодов трап-детектора полученного экспериментально и численно смоделированного, одинаковы.

Но из графиков на рис. 3–4 и рис. 6–7 видно, что формы кривых поляризационной зависимости суммарного тока трап-детекторов численной модели и полученные экспериментально не совпадают. Причина может заключаться в том, что реальный эксперимент проходил в неидеальных условиях: влияние фонового и локального освещения, погрешности юстировки установки, разная чувствительность различных фотодиодов, т.е. их внутренняя квантовая эффективность, неравномерность распределения чувствительности на поверхности активного слоя фотодиодов. Данное предположение было проверено путем внесения в численную модель трап-детектора условий реального эксперимента.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В исходные данные численной модели, результаты которой, для идеальных условий, представлены на рис. 2–4, были внесены изменения, моделирующие реальные условия проведения

эксперимента, отличающиеся от идеальных. Это такие условия, как неточность юстировки установки, различный коэффициент поглощения фотодиодов, влияние фонового освещения и его неравномерность.

Были смоделированы:

- плоскость 1/2 пластины не перпендикулярна направлению распространения луча (оптической оси) (коэффициент эллипсоидальности интенсивности излучения при вращении 1/2 пластины (синусоидальность) равен 0,2;

- коэффициенты поглощения отдельных фотодиодов, составляющих трап-детектор, не одинаковы: первого фотодиода (ФД-1): $K_{n1} = 1,3$; второго фотодиода (ФД-2): $K_{n2} = 2,7$; третьего фотодиода (ФД-3): $K_{n3} = 7,5$;

- смоделировано влияние фонового освещения, заключающееся в том, что при повороте 3-го фотодиода относительно оптической оси при изменении конфигурации трап-детектора, на 3-й фотодиод в каждой конфигурации фоновое излучение падало по-разному (измеряемый луч 3-м фотодиодом отражается либо на 2-й фотодиод в 3-диодном QED100, либо на первый фотодиод в новой конструкции).

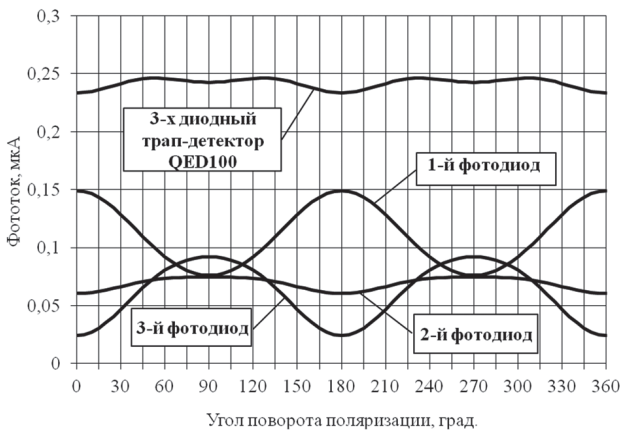


Рис. 8. Численная модель поляризационной зависимости фототоков 3-диодного трап-детектора QED100 и составляющих его фотодиодов при неидеальных условиях эксперимента

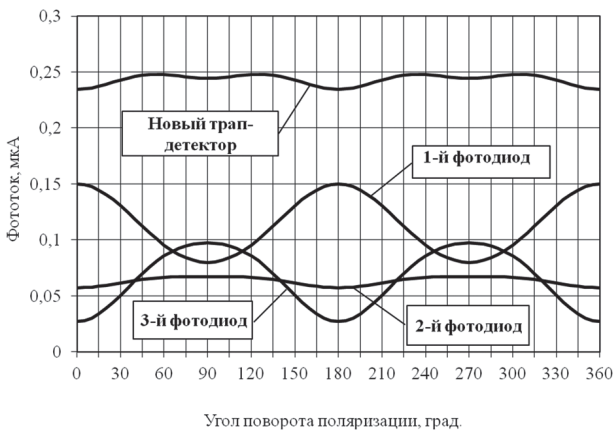


Рис. 9. Численная модель поляризационной зависимости фототоков новой конфигурации трап-детектора и составляющих его фотодиодов при неидеальных условиях эксперимента

Результат моделирования зависимостей фототоков от угла поворота поляризации плоскополяризованного излучения для исследуемых детекторов и фотодиодов их составляющих при эмуляции неидеальности условий проведения эксперимента, представлены на рис. 8 для 3-диодной QED100 конфигурации и на рис. 9 для нового трап-детектора.

Рис. 10 и 11 показывают сравнительные характеристики результатов измерения фототоков рассматриваемых трап-детекторов при вращении плоско-поляризованного излучения для численной модели неидеальных условий измерений (рис. 10) и результаты эксперимента (рис. 11).

ВЫВОДЫ

Численная модель распространения плоскополяризованного излучения в трап-детекторе позволила, путем подстановки в нее параметров, характерных для условий проведения эксперимента, воссоздать зависимость фототока от плоско-поляризованного излучения. Полученная зависимость совпадает с экспериментальными данными.

Моделирование неидеальных условий проведения измерений показало, что даже при незначительных отклонениях юстировки уста-

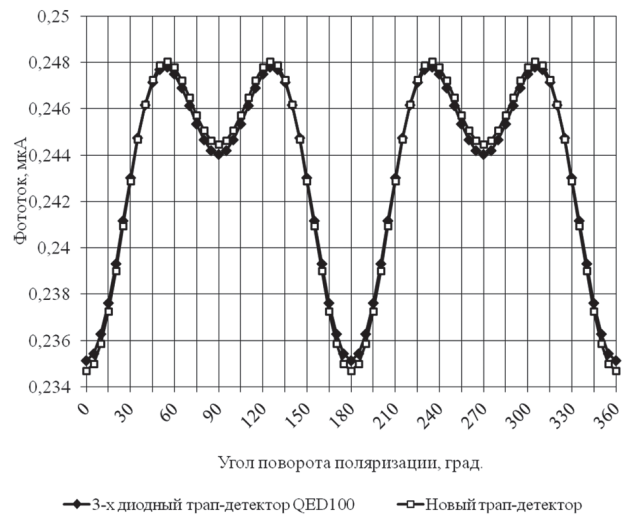


Рис. 10. Сравнение токов трап-детекторов, построенных по численной модели



Рис. 11. Сравнение экспериментально полученных токов трап-детекторов

новки, результаты измерения могут измениться в значительной мере. Это необходимо учитывать при проведении измерений с трап-детекторами. Проблему может частично решить оптико-волоконное исполнение измерительной установки на базе трап-детектора, т.к. в этом случае юстировка несколько упрощается. Но здесь возникает проблема, связанная с тем, что с вывода оптического волокна излучение не коллимированное, а расходящееся.

Литература

- [1] Edward F. Zalewski. Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency / Edward F. Zalewski, C. Richard Duda. // *Applied Optics*. — 1983. — Vol. 22, No. 18. — P. 2867–2873.
- [2] Absolute radiometric detector: patent 4498012 United States: Int. Cl. G01J 1/42 / C. Richard Duda — № 463258; filed Feb. 2, 1983; Feb. 5, 1985.
- [3] Татьяна Д.Н. Трап-детектор оптического излучения с улучшенными характеристиками. / Д.Н. Татьяна // *Прикладная радиоэлектроника*. — 2009. — Том 8, № 1. — С. 94–98.
- [4] K. D. Stock. Spectral characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards / K. D. Stock, R. Heine // *Metrologia*. — 2000. — Vol. 37. — P. 449–452.
- [5] K.D. Stock. Spectral characterization of Ge trap detectors and photodiodes used as transfer standards. / K D Stock, R Heine, H Hofer // *Metrologia*. 2003. — 40 — P. S163–S166.
- [6] N. P. Fox. Improved Near-Infrared Detectors / N. P. Fox // *Metrologia*. — 1993. — 30. — P. 321–325.
- [7] J. M. Palmer. Alternative Configurations for Trap Detectors / J. M. Palmer // *Metrologia*. — 1993. — 30. — P. 327–333.
- [8] Трап-детектор: патент на винахід 87197 Україна: МПК (2009) G01J 5/02, G01J 5/20, G01J 1/42 / Татьяна Д.М. — № а200710120; заявл. 10.09.2007; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12/2009.
- [9] Трап-детектор: патент на изобретение 2405129 Российская Федерация: МПК G01J 1/42 (2006.01) / Татьяна Д. Н. — № 2008137072/28; заявл. 15.09.2008; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33.
- [10] R. Goebel, S. Yilmaz and R. Pello. Polarization dependence of trap detectors. // *Metrologia*, 1996, 33. — P. 207–213.
- [11] P. Kohns. Influence of polarization and misalignment of the signal of a trap detector. / P. Kohns, A. Krasnogov, Yu. Machechin // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* — 2003. — Вып. 131 — С. 150–154.

Поступила в редколлегию 18.02.2014

Татьянко Дмитрий Николаевич, младший научный сотрудник отдела нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: спектральная интерферометрия и ее применение в измерительных системах, высокоточные измерения энергетических и спектральных характеристик когерентного и шумового



оптического излучения, оптоэлектронная техника.

Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: лазерное измерительное оборудование и оптоэлектронная техника.

Лукин Константин Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом нелинейной динамики электронных систем Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Член IEEE, ICTP Senior Associate, руководитель исследовательской группы “Шумовая радарная технология” научно-исследовательского агентства НАТО. Научные интересы: генерация динамического хаоса и хаотических колебаний, шумовая радарная технология и наземные РЛС для дистанционного зондирования.



УДК 681.7.069

Вплив умов проведення вимірювань на поляризаційну залежність трап-детекторів / Д. М. Татьянако, Ю. П. Мачехин, К. О. Лукин // *Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал*. — 2014. — Т. 13. — № 1. — С. 83–87.

У роботі наведені результати експериментальних досліджень поляризаційної залежності струму 3-діодного аналога трап-детектора QED-100 і нової конструкції трап-детектора. Наведено результати чисельного моделювання поляризаційної залежності трап-детекторів за ідеальних умов вимірювань і з урахуванням впливу умов проведення експерименту та проведено їх порівняння з експериментальними даними.

Ключові слова: трап-детектор, поляризація оптического випромінювання.

Л.: 11. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 681.7.069

Influence of measurement conditions on the polarization dependence of trap detectors / D. N. Tatyanko, Yu. P. Machechin, K. A. Lukin // *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* — 2014. — Vol. 13. — № 1. — P. 83–87.

The paper presents the results of experimental studies of the polarization dependence of a threediode QED-100 trap detector and a new trap detector as well as those of numerical modelling of the polarization dependence of the trap detectors under ideal measurement conditions and considering the influence of experimental conditions. The results of numerical modelling are compared with experimental data.

Keywords: trap detector, polarization of optical radiation.

Fig.: 11. Ref.: 11 items.