

УДК 535.341

DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-8-20-26

ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ФОТОНА В СРЕДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОЧАСТИЦЫ МЕТАЛЛА

К.А. Молдосанов, Н.Ж. Кайрыев, В.М. Лелевкин

Аннотация. Среда, содержащая металлические наночастицы, в диапазоне терагерцевого излучения, обладает чрезвычайно нелинейной зависимостью коэффициента поглощения от фактора заполнения среды наночастицами – параметра, характеризующего объёмную долю, занимаемую наночастицами в среде. Особенность поглотительных свойств такой среды в том, что её эффективный коэффициент поглощения обеспечивается всем множеством наночастиц, а наибольшую вероятность поглощения фотона можно обеспечить в наночастицах на краю среды (в частности, в терагерц-инфракрасном конвертере – на краю, обращённом к инфракрасной камере). Именно такие краевые наночастицы, нагретые поглощенными фотонами, становятся источниками инфракрасного излучения и позволяют визуализировать источник терагерцевого излучения – создать его изображение с помощью инфракрасной камеры. Для разработки терагерц-инфракрасного конвертера, предназначенного для визуализации раковой ткани, выполнена оценка фактора заполнения среды и соответствующей концентрации наночастиц золота диаметром 8,5 нм для излучения с частотой 0,38 ТГц, обеспечивающей наибольшую контрастность изображения границы раковой и здоровой биологической ткани. Фактор заполнения следует выбирать в диапазоне 0,5–0,6, что соответствует концентрациям наночастиц $(1,5 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$.

Ключевые слова: визуализация; конвертер; концентрация; матрица; наночастица; поглощение; раковая биоткань; терагерц; фактор заполнения; фотон.

МЕТАЛЛ НАНОБӨЛҮКЧӨЛӨРҮ БАР ЧӨЙРӨНҮН ТЕРАГЕРЦ ФОТОНУН ЖУТУУСУНУН ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ

К.А. Молдосанов, Н.Ж. Кайрыев, В.М. Лелевкин

Аннотация. Нанобөлүкчөлөрү бар чөйрөнүн терагерц жыштыктарындагы нурларды жутуу коэффициентинин ошол чөйрөнүн нанобөлүкчөлөр менен толтурулуу факторунан (б.а. чөйрөдөгү нанобөлүкчөлөр ээлеген көлөмдүн үлүшүн мүнөздөөчү параметрден) көз карандылыгы өтө сызыктуу эмес болуп саналат. Мындай чөйрөнүн жутуу касиеттеринин өзгөчөлүгү – анын эффективдүү жутуу коэффициенти андагы болгон бардык нанобөлүкчөлөрдүн көптүгү аркылуу аныкталат жана фотондордун эң ыктымалдуу жутулушун чөйрөнүн четиндеги (мисалы, терагерц-инфракызыл конвертеринде – инфракызыл камерага караган четиндеги) нанобөлүкчөлөр аркылуу камсыз кылса болот. Фотондорду жакшы жуткан бул четтеги нанобөлүкчөлөр ысышат да, инфракызыл нурлануунун булагы болуп калышат, демек, терагерц нурлануусунун булагын сүрөттөөгө – инфракызыл камеранынын жардамы менен анын сүрөттөлүшүн түзүүгө мүмкүнчүлүк берет. Рак тканынын сүрөттөлүшүн алуу үчүн колдонгонго боло турган терагерц-инфракызыл конвертерин түзүү максатында чөйрөнүн толтурулуу факторун жана ага туура келүүчү диаметри 8,5 нм болгон алтын нанобөлүкчөлөрүнүн концентрациясын баалоо жүргүзүлгөн. Баалоо 0,38 ТГц жыштыгындагы нурлануу үчүн жүргүзүлдү. Себеби, бул жыштыкта рак жана биологиялык таза ткандардын чек арасынын сүрөттөлүшүнүн эң жогорку контрастуулугун камсыздаса болот. Толтурулуу факторун 0,5–0,6 диапазонунда тандоо керек, бул нанобөлүкчөлөрдүн $(1,5 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$ концентрациясына туура келет.

Түйүндүү сөздөр: жутуу; конвертер; концентрация; матрица; нанобөлүкчө; сүрөттөө; рак биотканы; терагерц; толтурулуу фактору; фотон.

FEATURES OF TERAHERTZ PHOTON ABSORPTION IN A MEDIUM CONTAINING METAL NANOPARTICLES

К.А. Moldosanov, N.Z. Kairiyev, V.M. Lelevkin

Abstract. In the terahertz radiation range, a medium containing metal nanoparticles has an extremely nonlinear dependence of the absorption coefficient on the factor of filling the medium with nanoparticles – a parameter characterizing the volume fraction occupied by nanoparticles in the medium. The peculiarity of the absorption properties of such a medium is that its effective absorption coefficient is provided by the entire set of nanoparticles, and the highest probability of photon absorption can be ensured in nanoparticles at the edge of the medium (in particular, in a terahertz-to-infrared converter – at the edge facing the infrared camera). It is these edge nanoparticles, heated by absorbed photons, that become sources of infrared radiation and make it possible to visualize the source of terahertz radiation – to create its image using an infrared camera. In order to develop a terahertz-to-infrared converter intended for visualization of cancerous tissue, the filling factor of the medium and the corresponding concentration of gold nanoparticles with a diameter of 8.5 nm were assessed for radiation with a frequency of 0.38 THz, which provides the highest image contrast of the margin of cancerous and healthy biological tissue. The filling factor should be selected in the range of 0.5–0.6, which corresponds to the concentration of nanoparticles $(1.5 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ mm}^{-3}$.

Keywords: visualization; converter; concentration; matrix; nanoparticle; absorption; cancerous tissue; terahertz; filling factor; photon.

Введение. Ранее мы разрабатывали терагерц-инфракрасные (ТГц-ИК) конвертеры [1–10] для задач визуализации источников ТГц излучения, которые можно было бы использовать в задачах онкологии (для диагностирования, например, заболеваний кожи), в криминалистике и в области безопасности (для обнаружения предметов, скрытых под одеждой, неразрушающего контроля содержимого конвертов и т. п.). В частности, было показано [1], что при использовании наночастиц золота диаметром 8,5 нм для визуализации раковой ткани выгодно выбрать частоту 0,38 ТГц. Она позволила бы обеспечить наибольшую контрастность границы раковой и здоровой ткани – важную информацию для хирурга-онколога.

Оставался невыясненным важный вопрос: как обеспечить высокую (не менее 0,95) вероятность поглощения ТГц фотона наночастицей в ТГц-ИК конвертере?

Из требования, что фотон, проникнув в среду с коэффициентом поглощения α на глубину l , должен поглотиться в наночастице, находящейся на этой же глубине l , с вероятностью 0,95 следует, что вероятность проникновения фотона на глубину l равна $p = \exp(-\alpha \cdot l) \leq 0,05$. Отсюда $\alpha \cdot l \geq 3$, и требование к коэффициенту поглощения: $\alpha \geq 3/l$. Ниже (в таблице 1) мы убедимся, что с этим требованием согласуются подобранные нами по графикам экспериментальной работы [11] коэффициент поглощения $\alpha \approx 10^3 \text{ см}^{-1}$ и фактор наполнения (объемная доля наночастиц в среде) $f = 0,32$ для $l = 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}$.

Коэффициент поглощения сред с наночастицами оказывается очень нелинейной функцией фактора наполнения f и частоты ТГц излучения [11]. Обеспечение вероятности поглощения ТГц фотона 0,95 сводится к подбору фактора наполнения f для конкретной рабочей частоты конвертера, и далее, по выбранному фактору наполнения – определению приемлемого коэффициента поглощения среды с наночастицами.

Оценка вероятности поглощения ТГц фотона наночастицей металла в ТГц-ИК конвертере. Рабочим элементом ТГц-ИК конвертеров является матрица, прозрачная в области регистрируемого ТГц излучения и в области рабочих длин волн ИК камеры, содержащая множество наночастиц-нанообразователей (рисунок 1). В таких наночастицах происходит превращение энергии ТГц фотонов в теплоту, а нагретые наночастицы становятся видимыми для чувствительной ИК камеры и способны формировать изображение источника ТГц излучения в ИК лучах (см. работы [1, 2] и ссылки в них).

В старой работе 1978 г. [11], когда вместо терминов «терагерцевое излучение» и «наночастица» ещё использовали архаизмы «*far infrared*» (дальнее инфракрасное излучение) и «*ultrafine particle*» (ультрамалая частица), а частоту излучения измеряли в единицах « см^{-1} », были опубликованы ценные сегодня графики о коэффициенте поглощения среды, содержащей наночастицы алюминия, в ТГц



Рисунок 1 – Терагерц-инфракрасный конвертер – матрица, содержащая металлические наночастицы [1, 2]

диапазоне частот как функции объёмной доли f наночастиц в среде и в зависимости от частоты излучения. Сегодняшний «ренессанс» интереса к старым графикам вызван проблемой поглощения ТГц фотонов в подобной среде в связи с разработкой не существовавших прежде детекторов, способных обеспечить визуализацию источников ТГц излучения.

Хотя упомянутые исследования [11] были выполнены для наночастиц алюминия, их можно применить и для наночастиц золота благодаря схожести металлов – оба имеют одинаковый тип кристаллической решётки (гранцентрированная кубическая) и близкие значения постоянных решетки (0,405 нм у Al и 0,408 нм у Au [12]), а электроны описываются в рамках теории свободных электронов. Мы полагаем, что эта работа позволяет выявить, по крайней мере, главные особенности поглощения ТГц фотонов наночастицами золота в матрице.

Из графика на рисунке 2 видно, что коэффициент поглощения α матрицы с наночастицами стремительно и нелинейно увеличивается с ростом фактора наполнения f между 0,2 и 0,35. Поэтому в этой же области изменения фактора f будет ещё быстрее уменьшаться вероятность p проникновения фотона на глубину l вглубь матрицы с наночастицами, $p = \exp(-\alpha \cdot l)$.

Проанализируем ситуацию с поглощением ТГц фотона в среде, содержащей наночастицы металла, при разных факторах её наполнения. Рассмотрим данные для наночастиц алюминия на примере рисунка 2.

Вероятность проникновения фотона $p = \exp(-\alpha \cdot l)$ означает вероятность, что фотон проникнет на глубину l среды с коэффициентом поглощения α и ещё не поглотится.

При фиксированном l (толщине матрицы с наночастицами в ней) нам нужно выбрать значение коэффициента поглощения α (и соответствующее значение фактора f), при котором вероятность поглощения фотона наночастицей на глубине проникновения l будет очень высока, то есть величина p достаточно мала. Пусть $l = 0,1 \text{ мм} \equiv 10^{-2} \text{ см}$. По графику на рисунке 2 мы определили величины коэффициентов поглощения α для разных величин фактора наполнения f .

Данные таблицы 1 показывают, что при факторе наполнения матрицы наночастицами алюминия размером 8 нм $f = 0,32$, при толщине матрицы $l = 10^{-2} \text{ см}$ обеспечивается надёжное поглощение ТГц фотона с частотой 6 ТГц – в последней наночастице (находящейся на краю матрицы, обращённом к объективу ИК-камеры). И таким образом, с большой вероятностью будет иметь место нагрев только последних наночастиц в матрице.

Таким образом, анализ данных таблицы 1 показывает, что наиболее приемлемым фактором наполнения является $f = 0,32$. Анализ также показывает, что идея использования наночастиц для визуализации ТГц излучения оправданна – матрица с наночастицами позволила бы реализовать эту идею.

Чтобы увидеть ход изменения вероятности поглощения ТГц фотона в толще матрицы, оценим величины p при постоянном факторе наполнения 0,32 (то есть при постоянном коэффициенте поглощения среды $\alpha = 10^3 \text{ см}^{-1}$) при разных глубинах проникновения ТГц фотона l в матрицу. Пусть l изменяется от $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ до $1 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ с шагом $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}$.

Из данных таблицы 2 видно, что ТГц фотон может с достаточно высокой вероятностью поглотиться и в одной из наночастиц в толще матрицы (то есть, не доходя до края матрицы). Это не ухудшит

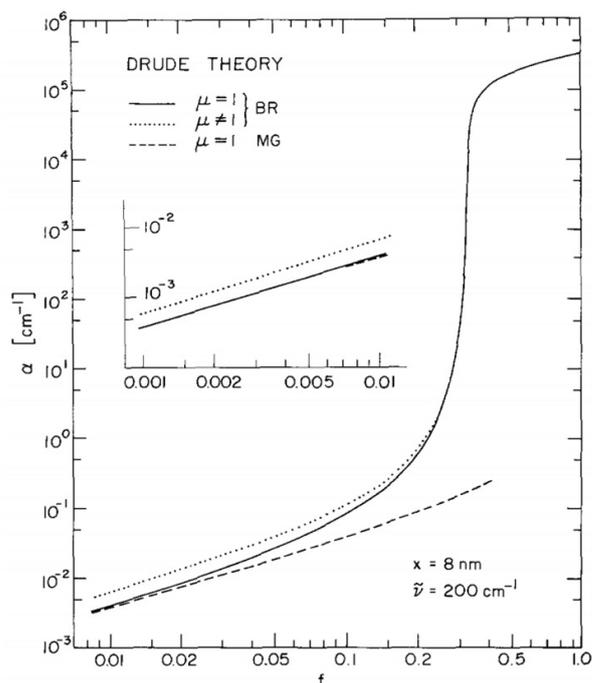


Рисунок 2 – Коэффициент поглощения α среды с наночастицами алюминия диаметром 8 нм в зависимости от фактора наполнения f для частоты 200 см^{-1} (6 ТГц). (Из работы [11, с. 34]; подробности см. в [11])

Таблица 1 – Параметры матрицы с наночастицами алюминия размером 8 нм при частоте ТГц фотона 200 см^{-1} (6 ТГц) (величины f и α – из графика рис. 2). Толщина матрицы равна $l = 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}$

f	$\alpha, \text{ см}^{-1}$	$\alpha \cdot l$	p
0,30	$2,5 \cdot 10$	0,25	0,779
0,31	10^2	1	0,368
0,32	10^3	10	$4,5 \cdot 10^{-5}$
0,33	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$	$7,1 \cdot 10^{-218} \approx 0$
0,34	$5,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^{-239} \approx 0$
0,35	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^{-261} \approx 0$
0,40	10^5	10^3	$5,1 \cdot 10^{-435} \approx 0$

Таблица 2 – Вероятность проникновения p ТГц фотона в среду с наночастицами алюминия размером 8 нм как функция глубины проникновения (при $f = 0,32$ и $\alpha = 10^3 \text{ см}^{-1}$)

$l, \times 10^{-3} \text{ см}$	1	2	3	4	5
$\alpha \cdot l$	1	2	3	4	5
p	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007
$l, \times 10^{-3} \text{ см}$	6	7	8	9	10
$\alpha \cdot l$	6	7	8	9	10
p	0,0025	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$

характеристик ТГц-ИК-конвертера, так как типичная глубина резкости объектива ИК-камеры, используемой для совместной работы с ТГц-ИК конвертером, составляет $\approx 0,3$ мм [1], то есть больше толщины матрицы $l = 0,1$ мм. Поэтому объектив ИК-камеры будет воспринимать нагретую в толще матрицы наночастицу так же, как и наночастицу, нагретую на поверхности матрицы (на выходе из неё).

Обсуждение. Мы выполнили анализ для частоты 6 ТГц. А как будет меняться коэффициент поглощения при том же факторе наполнения, но при частотах меньше, чем 6 ТГц? Нас интересует «медицинская» частота 0,38 ТГц. На этот вопрос отвечает график на рисунке 3, заимствованный из той же статьи [11]. Тут нет графика для $f = 0,32$, но из общего характера поведения графиков для различных значений f можно предположить, что изменение коэффициента поглощения и для $f = 0,32$ пойдёт аналогичным образом.

«Медицинская» частота 0,38 ТГц в единицах « см^{-1} » равна $0,38/0,03 = 12,7 \text{ см}^{-1}$. Видно, что для этой частоты нельзя использовать рассмотренную матрицу толщиной $l = 0,1$ мм с фактором наполнения $f = 0,32$. Действительно, для частоты $12,7 \text{ см}^{-1}$ и для $f = 0,32$ по рисунку 3 (по абрису графика) грубо оценим $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$. Это в $10^3/5 \cdot 10^{-1} = 2 \cdot 10^3$ раз меньше коэффициента поглощения для частоты 6 ТГц. В результате, матрица толщиной 0,1 мм с фактором наполнения $f = 0,32$ на частоте 0,38 ТГц будет прозрачной, и наночастицы не поглотят ТГц фотон, а ИК-камера не «увидит» нагретой ТГц фотоном наночастицы золота. Отсюда следует вывод: если на частоте 0,38 ТГц использовать прежнюю пару параметров $\alpha \approx 10^3 \text{ см}^{-1}$ и $l = 0,1$ мм, то нужно увеличить фактор наполнения f до $\sim 0,5-0,6$.

Допуская, что этот вывод применим и для наночастиц из золота диаметром 8,5 нм, оценим концентрацию n наночастиц золота в матрице, которая обеспечила бы фактор наполнения $f \sim 0,5-0,6$. По определению, $n = N/V$, где V – объём матрицы, содержащей N наночастиц золота диаметром D . Тогда справедливо соотношение: $f \cdot V = N \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot (D/2)^3$. Отсюда: $f = n \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot (D/2)^3$, и для концентрации получим: $n = 6 \cdot (f/\pi \cdot D^3)$.

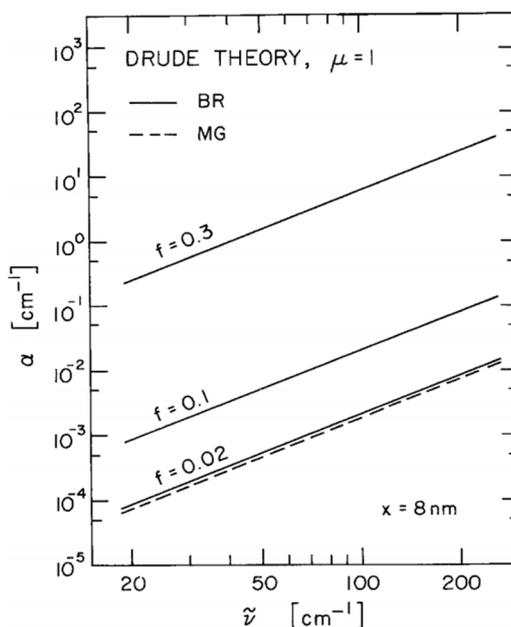


Рисунок 3 – Коэффициент поглощения α среды с наночастицами алюминия диаметром 8 нм в зависимости от частоты для трех значений фактора наполнения f (из работы [11, с. 35]; подробности см. в [11])

Для случаев $f = 0,5$ и $f = 0,6$ при диаметре наночастиц золота $D = 8,5$ нм получим, соответственно, $n \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$ и $n \approx 1,9 \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$. Таким образом, на «медицинской» частоте 0,38 ТГц следует использовать матрицу с наночастицами золота диаметром 8,5 нм при концентрациях наночастиц в диапазоне $(1,5 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$.

Важно предвидеть вероятные технологические проблемы, связанные с реализацией идеи ТГц-ИК конвертера. Из произведённых оценок видно, что наночастицы металла в ТГц-ИК конвертере занимают значительную часть объема матрицы. Возможно, это обусловит трудность изготовления ТГц-ИК конвертера. В этой связи, может оказаться перспективным подход с внесением наночастиц золота в мембрану из полиэтиленгликоля, исследованный в работах [13, 14].

Другая возможная проблема: отрыв и выпадение наночастиц из матрицы. По-видимому, решением этой проблемы была бы трехслойная структура ТГц-ИК конвертера, состоящая из слоя, прозрачного в ТГц диапазоне (он должен быть обращен к источнику ТГц излучения), собственно ТГц-ИК конвертера, и слоя, прозрачного в ИК диапазоне (он должен быть обращен к объективу ИК камеры).

Таким образом, особенность среды с наночастицами металла заключается в том, что её эффективный коэффициент поглощения обеспечивается всем множеством наночастиц металла в толще слоя матрицы, а энергию ТГц фотона с высокой вероятностью поглощает и нагревается лишь наночастица, расположенная на краю слоя (матрицы). Именно такие краевые наночастицы позволяют визуализировать источник ТГц излучения, т. е. создать его изображение в ИК лучах, наблюдаемое ИК камерой.

Заключение. Оценки показывают, что вероятность поглощения ТГц фотона наночастицей металла в среде, содержащей множество наночастиц, может быть высокой при довольно высоком факторе заполнения матрицы наночастицами ($f \sim 0,5-0,6$) даже в достаточно тонких средах-матрицах ($\sim 0,1$ мм). Это подтверждает перспективность нашего подхода к проблеме визуализации источников ТГц излучения с помощью ТГц-ИК конвертеров, выполненных в виде матрицы с наночастицами металла, снабжённых чувствительной ИК камерой.

Для работы на «медицинской» частоте 0,38 ТГц следует использовать матрицу с наночастицами золота диаметром 8,5 нм при концентрациях наночастиц в диапазоне $(1,5 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ мм}^{-3}$.

Мы выполнили оценки, опираясь на старую работу 1978 г. о поглощении ТГц излучения наночастицами алюминия. Очевидно, что для получения более точных данных для практической реализации ТГц-ИК конвертеров с наночастицами золота, требуется выполнить специальные исследования о поглощении ТГц излучения наночастицами золота в прозрачных средах-матрицах.

Поступила: 29.05.24; рецензирована: 12.06.24; принята: 14.06.24.

Литература

1. *Moldosanov K.* Terahertz-to-infrared converters for imaging the human skin cancer: challenges and feasibility / K. Moldosanov, A. Bykov, N. Kairiyev, M. Khodzitsky, G. Kropotov, V. Lelevkin, I. Meglinski, A. Postnikov and A. Shakhmin // *Journal of Medical Imaging*. 2023. Vol. 10. № 2. P. 023501–1. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JMI.10.2.023501> (дата обращения: 28.05.2024).
2. *Moldosanov K.A.* Terahertz-to-infrared converter based on the polyvinylchloride matrix with embedded gold nanoparticles / K.A. Moldosanov, A.V. Bykov, N.Z. Kairiyev, M.K. Khodzitsky, G.I. Kropotov, V.M. Lelevkin, I.V. Meglinski, A.V. Postnikov, A.A. Shakhmin and O. Sieryi // *Proc. SPIE 11868, Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence VI*, 118680S (12 September 2021). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2602089> (дата обращения: 28.05.2024).
3. *Moldosanov K.A.* Prospects of designing gold-nanoparticles-based soft terahertz radiation sources and terahertz-to-infrared converters for concealed object detection technology / K.A. Moldosanov, A.V. Postnikov, V.M. Lelevkin and N.J. Kairiyev // *Proc. SPIE 11164. Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XII*, 111640B (Presented at SPIE Security + Defence: September 09, 2019; Published: 18 October 2019). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2532568> (дата обращения: 28.05.2024). Preprint: URL: <https://arxiv.org/abs/1908.07991> (дата обращения: 28.05.2024).
4. *Postnikov A.V.* Prospects for terahertz imaging the human skin cancer with the help of gold-nanoparticles-based terahertz-to-infrared converter / A.V. Postnikov, K.A. Moldosanov, N.J. Kairiyev and V.M. Lelevkin

- // Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics II, THz Circuits, Materials, Devices, 151–173 (2019). Maffucci Antonio and Maksimenko Sergey A. (Eds.) Springer Publisher. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-1687-9_9 (дата обращения: 28.05.2024). Preprint: URL: <https://arxiv.org/abs/1901.02346> (дата обращения: 28.05.2024).
5. *Postnikov A.V.* A device to inspect a skin cancer tumour in the terahertz range, transferring the image into the infrared A.V. Postnikov, K.A. Moldosanov, N.J. Kairyeu and V.M. Lelevkin // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 195. P. 10010. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819510010> (дата обращения: 28.05.2024).
 6. *Moldosanov K.A.* Terahertz imaging technique for cancer diagnostics using frequency conversion by gold nano-objects / K.A. Moldosanov, A.V. Postnikov, V.M. Lelevkin and N.J. Kairyeu // Ferroelectrics. 2017. Vol. 509. № 1. P. 158–166. URL: <https://doi.org/10.1080/00150193.2017.1296344> (дата обращения: 28.05.2024).
 7. *Молдосанов К.А.* Терагерц-инфракрасный конвертер для визуализации источников терагерцевого излучения / К.А. Молдосанов, В.М. Лелевкин, Н.Ж. Кайрыев, А.В. Постников // Патент Российской Федерации RU 2642119. Приоритет изобретения: 21 июня 2016 г. URL: https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=3897&DocNumber=2642119&TypeFile=html (дата обращения: 28.05.2024).
 8. *Кавеев А.К.* Устройство визуализации источников терагерцевого излучения / А.К. Кавеев, К.А. Молдосанов, В.М. Лелевкин, П.В. Козлов, Г.И. Кропотков, Д.И. Цыпишка // Патент Российской Федерации № 2511070 (2014). Извещение опубликовано: 10.04.2014. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2511070> (дата обращения: 28.05.2024).
 9. *Молдосанов К.А.* Терагерц-инфракрасный конвертер / К.А. Молдосанов, В.М. Лелевкин, Н.Ж. Кайрыев, А.К. Кавеев // Патент Кыргызской Республики № 1684 (2014). Извещение опубликовано 31.10.2014 в Бюллетене «Интеллектуалдык менчик – Интеллектуальная собственность» № 10 (187). С. 7–8, 2014. ISSN 1694-6871, г. Бишкек, 2014. URL: <https://drive.google.com/file/d/1RQK9slfUveZslkLXFwcADZNYcJpdFTrh/view> (дата обращения: 28.05.2024).
 10. *Moldosanov K.A.* Terahertz-to-infrared converter based on metal nanoparticles: potentialities of applications / K.A. Moldosanov, V.M. Lelevkin, P.V. Kozlov, and A.K. Kaveev // J. Nanophoton. 2012. Vol. 6. № 1. P. 061716. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JNP.6.061716> (дата обращения: 28.05.2024).
 11. *Granqvist C.G.* Far infrared absorption in ultrafine metallic particles: Calculations based on classical and quantum mechanical theories / C.G. Granqvist // Z. Physik B. 1978. Vol. 30. № 1. Pp. 29–46. <https://doi.org/10.1007/bf01323666>.
 12. *Ашкрофт Н.* Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. М.: Мир, 1979.
 13. *Zhao Z.* Gold nanoparticle-loaded porous poly(ethylene glycol) nanosheets for electrochemical detection of H₂O₂ / Z. Zhao, M. Zharnikov // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. № 24. P. 3137. URL: <https://doi.org/10.3390/nano13243137>.
 14. *Meyerbroker N.* Ultraflexible, free-standing nanomembranes based on poly(ethylene glycol) / N. Meyerbroker, M. Zharnikov // Adv. Mater. 2014. Vol. 26. № 20. Pp. 3328–3332. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201305480>.