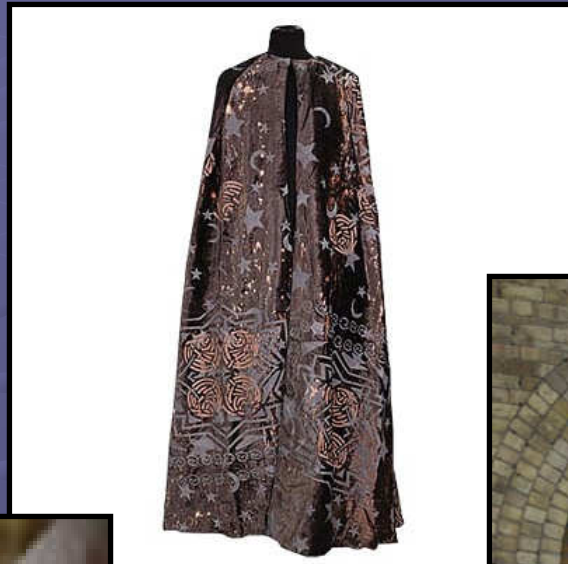


СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

48-ая Школа по физике
конденсированного состояния
10-15 марта 2014

В гостях у сказки

плащ-невидимка



парящие огни



уменьшитель



платформа 9 3/4

Что такое метаматериал?

Метаматериал («мета»-сверх (греч.)– искусственно созданный материал из макроскопических элементов, который не только наследует свойства составляющих его «атомов», но и приобретает новые, благодаря своей структуре и взаимодействию составляющих его «атомов». (с) «Наноазбука»



МЕТАМАТЕРИАЛЫ

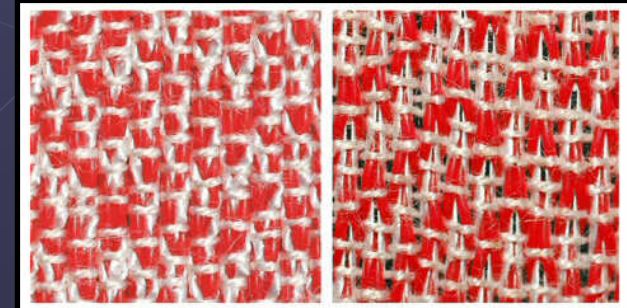
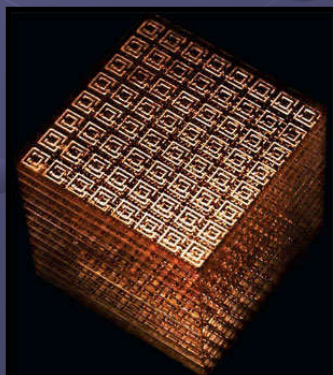
акустические

электромагнитные

сейсмические

механические

и т.д...



Электромагнитное поле и вещество

Степень взаимодействия вещества с электромагнитным полем определяется двумя характеристиками:

Диэлектрическая проницаемость (ϵ)

показывает во сколько раз кулоновская сила в вакууме больше такой же силы в данной среде

Магнитная проницаемость (μ)

показывает, во сколько раз магнитная индукция в данном веществе больше или меньше магнитной индукции в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость веществ

вещество	Диэлектрическая проницаемость среды
вода	81
керосин	2,1
масло	2,5
парафин	2,1
слюда	6
стекло	7

МАГНЕТИЗМ

Магнитные свойства вещества

МАГНЕТИКИ

СЛАБОМАГНИТНЫЕ
ВЕЩЕСТВА

СИЛЬНОМАГНИТНЫЕ
ВЕЩЕСТВА

ДИАМАГНЕТИКИ

ПАРАМАГНЕТИКИ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

- Водород
- Бензол
- Вода
- Медь
- Стекло
- Кварц
- Каменная соль
- Висмут
- Графит

- Азот
- Воздух
- Кислород
- Эбонит
- Алюминий
- Вольфрам
- Платина

- Железо
- Никель
- Кобальт

$$\mu \leq 1$$

$$\mu \geq 1$$

$$\mu \gg 1$$

μ - магнитная проницаемость вещества

Распространение электромагнитных волн. Коэффициент преломления

Уравнения Максвелла

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right.$$

Волновые уравнения

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad \nabla^2 \vec{B} - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Закон дисперсии для плоской волны

$$k = \frac{\omega}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} \frac{\omega}{c}$$

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

Коэффициент преломления

Преломление на границе двух сред



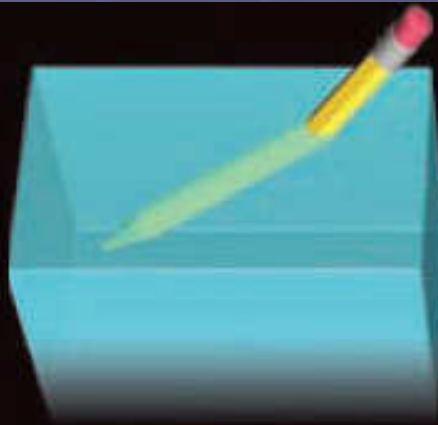
Коэффициент преломления – отношение фазовой скорости электромагнитных волн в среде и в вакууме. Зависит от свойств среды, длины волны излучения.

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \chi$$

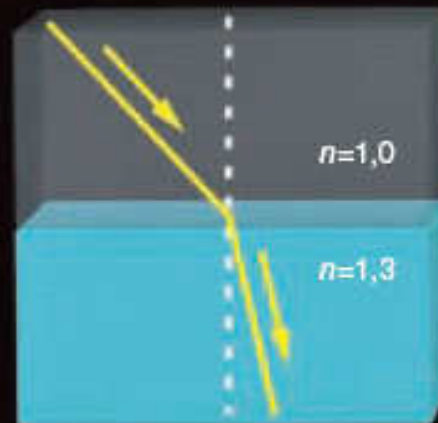
Отрицательный коэффициент преломления

СРЕДА С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды

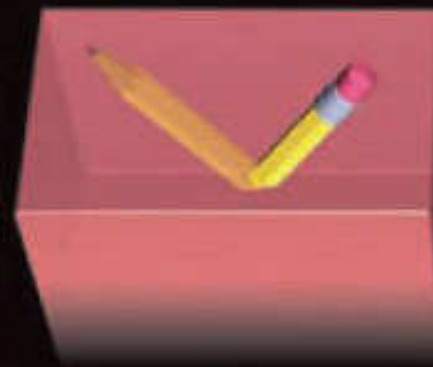


Когда свет переходит из среды с низким показателем преломления (n) в среду с более высоким, он отклоняется в сторону нормали (пунктирная линия под прямым углом к поверхности раздела)

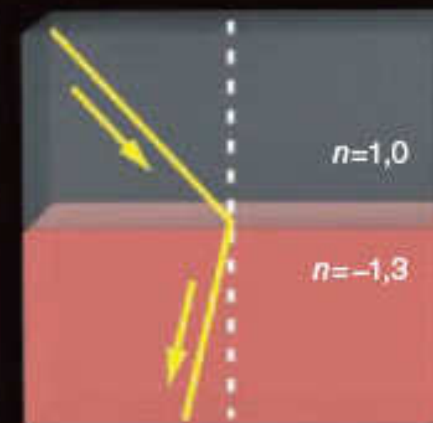


СРЕДА С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш, погруженный в среду с отрицательным преломлением, будет казаться изогнутым наружу



Когда свет идет из среды с положительным преломлением в среду с отрицательным, он отклоняется назад, оставаясь по ту же сторону нормали, что и падающий свет



Отрицательный коэффициент преломления.

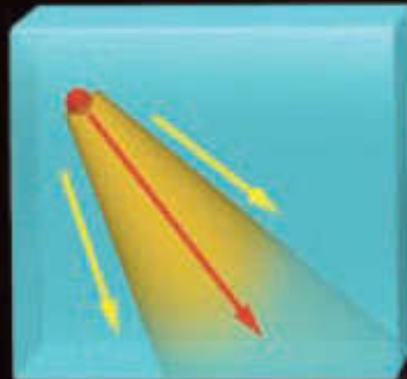
Удаляющийся объект кажется более красным из-за эффекта Доплера



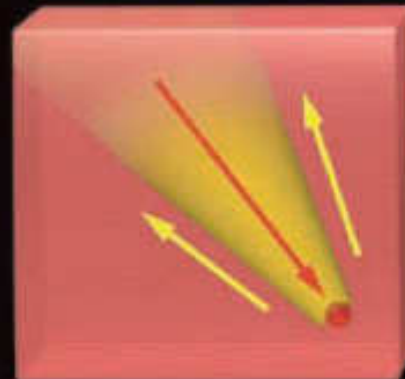
Удаляющийся объект кажется более синим



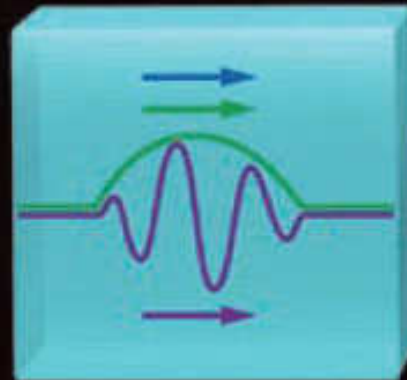
Заряженный объект (красный), движущийся быстрее скорости света, создает конус Черенковского излучения (желтый), направленный вперед



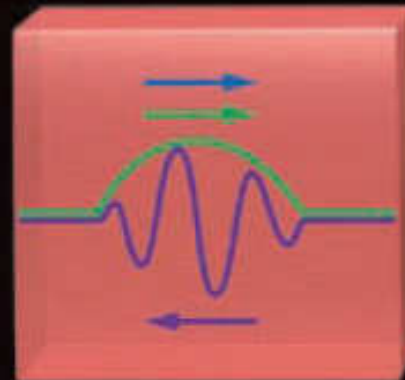
Конус обращен назад



В среде с положительным показателем преломления отдельные максимумы электромагнитного импульса (фиолетовый) движутся в том же направлении, что и огибающая (зеленая) импульса и энергия (синяя)

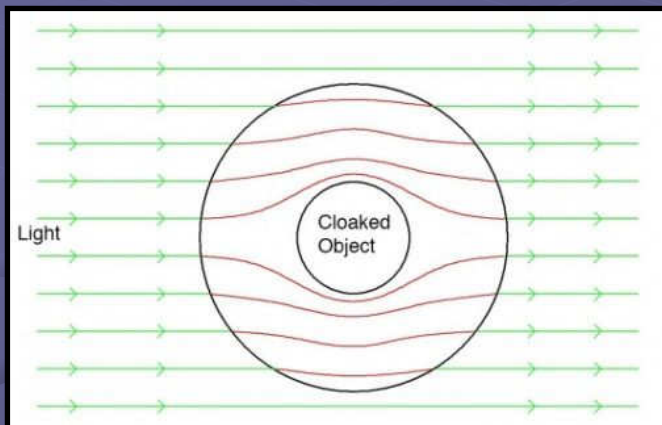


Отдельные всплески движутся в сторону, противоположную движению огибающей импульса и энергии

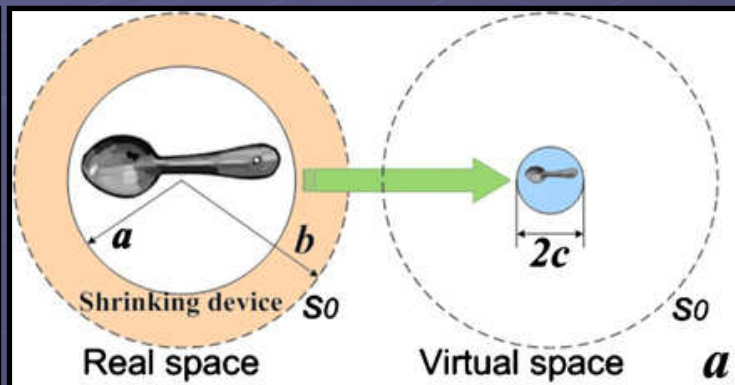


В гостях у сказки - 2

возможные применения материалов с отрицательным коэффициентом преломления

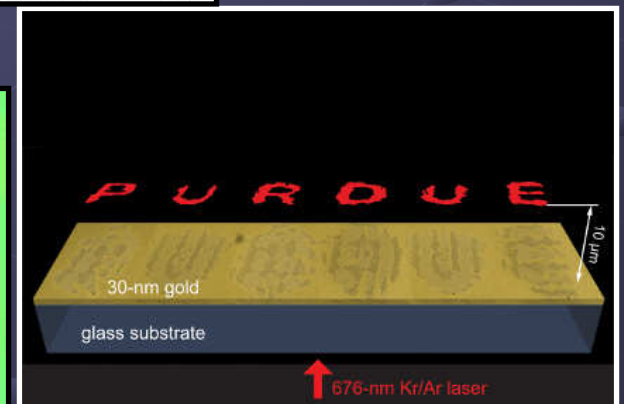
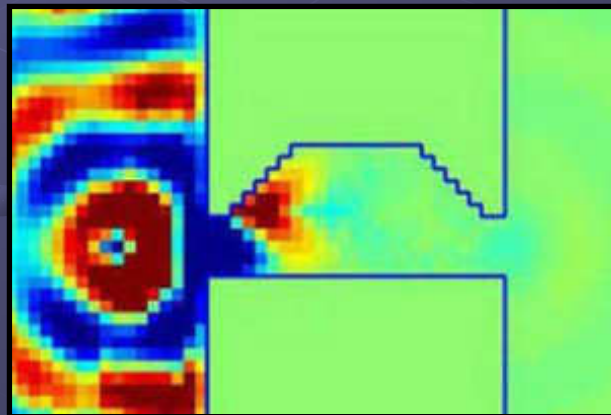


плащ-невидимка
(волна огибает
маскируемый объект)



Уменьшитель
(специальная
конструкция из
метаматериала
визуально уменьшает
скрытый объект)

Платформа 9 ¾ (конструкция
из метаматериала создает
иллюзию несуществующего
объекта)



парящая надпись
(сверхтонкая голограмма)

Метаматериал с отрицательным коэффициентом преломления (J.V.Pendry, 1997-1999)

Отрицательные ϵ или μ получаются в том случае, когда электроны в материале движутся в направлении, противоположном по отношению к силам, создаваемым электрическим и магнитным полями. Ключ к такого рода отрицательной реакции — резонанс, то есть стремление колебаться со специфической частотой. Он создается в метаматериале искусственно с помощью крошечных резонансных контуров, имитирующих отклик вещества на магнитное или электрическое поле.



В металле при частотах ниже плазменной частоты (при которой металл становится прозрачным) $\epsilon < 0$. Это достигается за счет того, что свободные электроны в металле экранируют внешнее электромагнитное поле.

Металлическое кольцо можно рассматривать как простейший колебательный контур. При этом система создает собственное магнитное поле, которое будет сонаправленным с внешним при частотах внешнего поля $\omega < \omega_0$ и разнонаправленным при $\omega > \omega_0$.

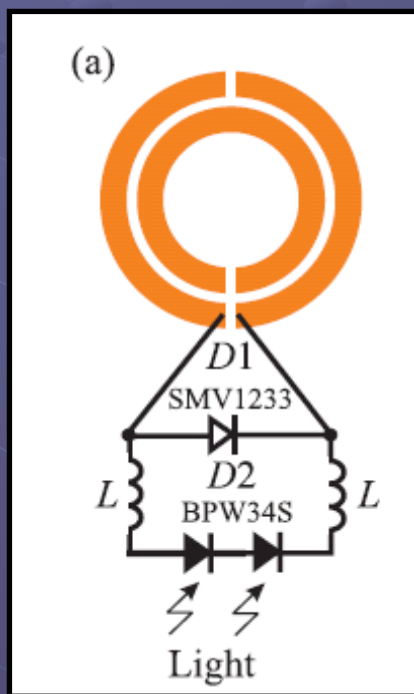
Метаматериал с отрицательным коэффициентом преломления (D.Smith at al, 2000)



Фотография метаматериала с отрицательным показателем преломления для микроволнового излучения.

Перестраиваемые нелинейные метаматериалы

С точки зрения практических приложений одним из перспективных направлений является создание перестраиваемых (например по частоте) и управляемых внешними полями метаматериалов. Также интересным представляется создание нелинейных метаматериалов, свойства которых зависят от величины приложенного внешнего поля (Ю.Кившарь, профессор Австралийского национального университета и обладатель мегагранта Минобрнауки России, реализуемого на базе ИТМО)



Проблемы при создании метаматериалов

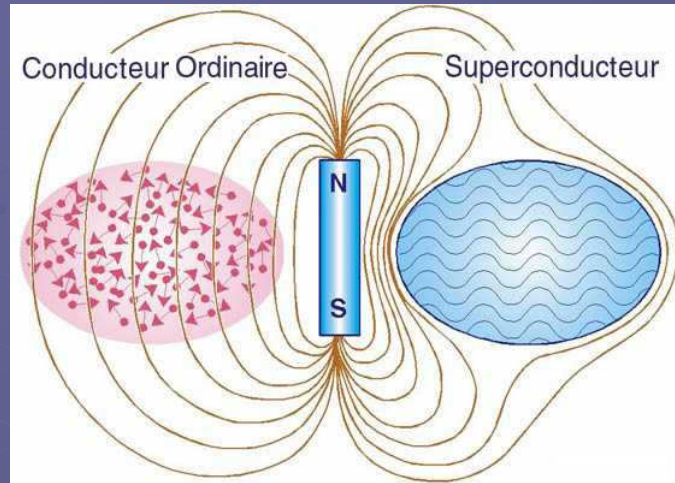
- Высокие энергетические потери при уменьшении размеров «атомов»

$$\Delta \sim \rho / r^2 \quad \text{для провода} \quad \begin{array}{l} \rho - \text{сопротивление} \\ r - \text{радиус} \end{array}$$
$$\Delta \sim \rho / tl \quad \begin{array}{l} \text{для кругового} \\ \text{резонатора} \end{array} \quad \begin{array}{l} l - \text{размер кольца} \\ t - \text{толщина материала} \end{array}$$

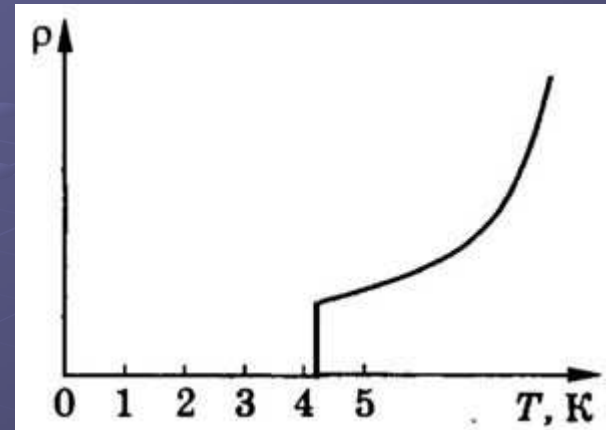
- Технологические сложности в создании «атомов» для нелинейных, перестраиваемых структур

ВЫХОД – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ!

Сверхпроводники и их свойства



Эффект Мейсснера

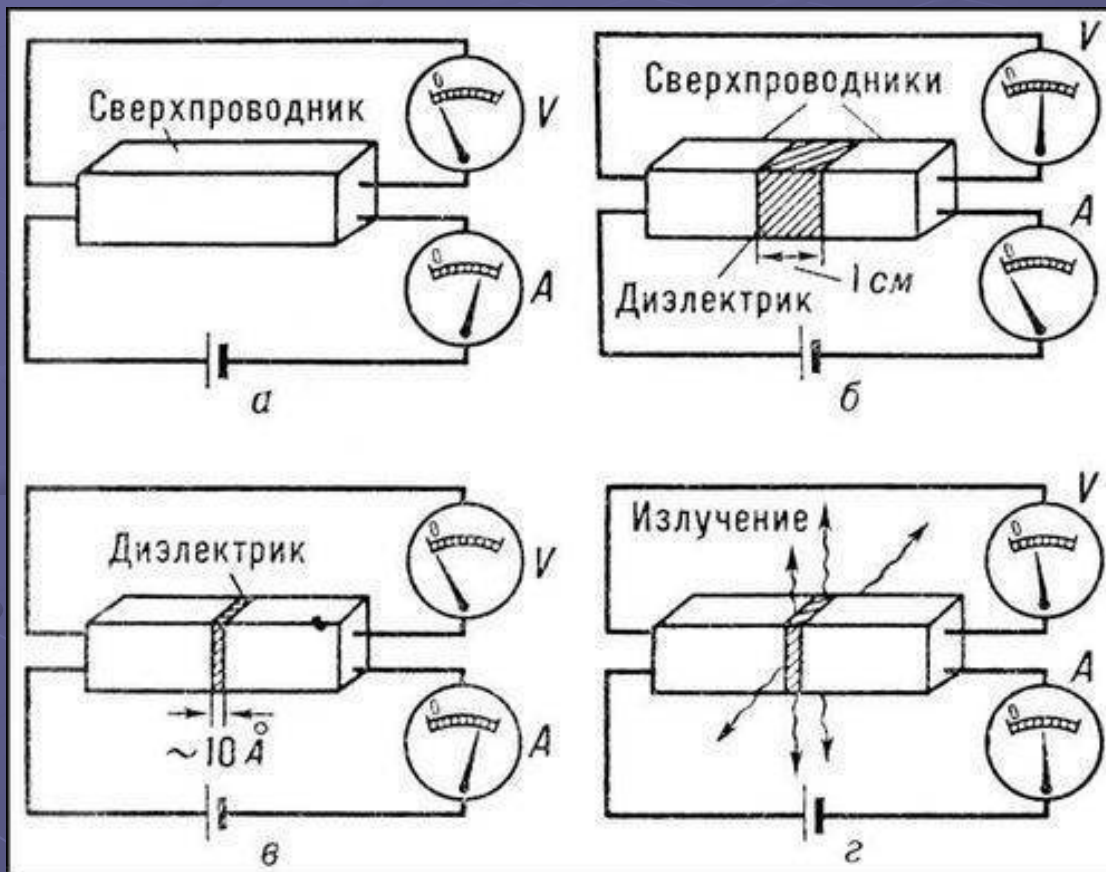


Нулевое сопротивление

$$\Psi(r) = \sqrt{n_s(r)} e^{i\phi(r)}.$$

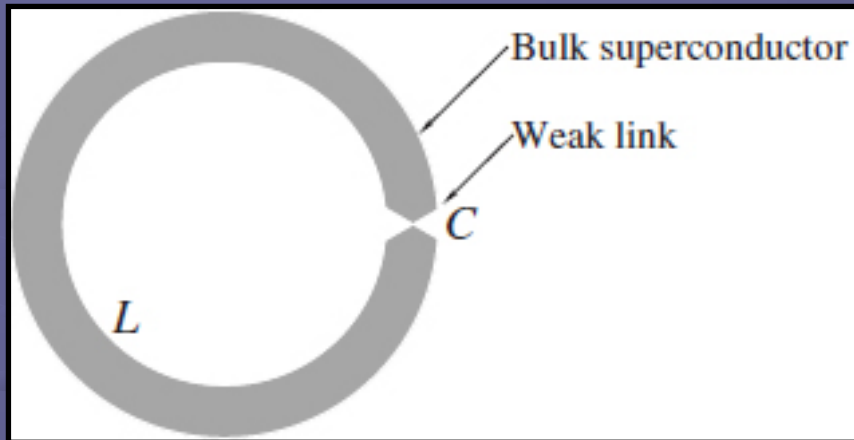
Макроскопические квантовые явления
(квантовая интерференция, туннелирование)

ЭФФЕКТЫ ДЖОЗЕФСОНА



Если ток через контакт Джозефсона не превышает определённого значения, называемого критическим током контакта, то падение напряжения на контакте отсутствует (так называемый стационарный Д. э., см. *рис.*, в). Если же через контакт пропускать ток, больший критического, то на контакте возникает падение напряжения V , и контакт излучает электромагнитные волны (нестационарный Д. э., *рис.*, г).

Квантовая интерференция, СКВИДЫ



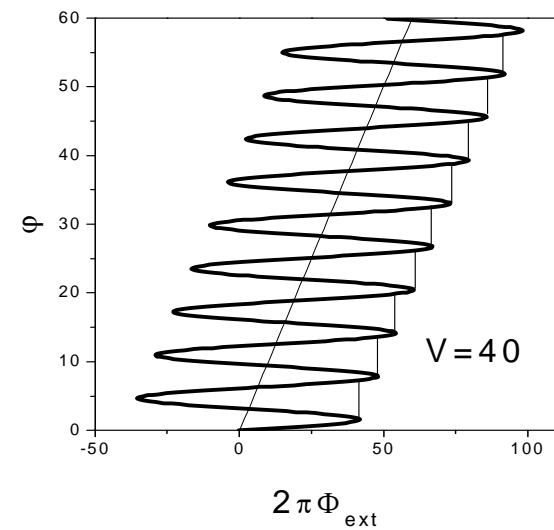
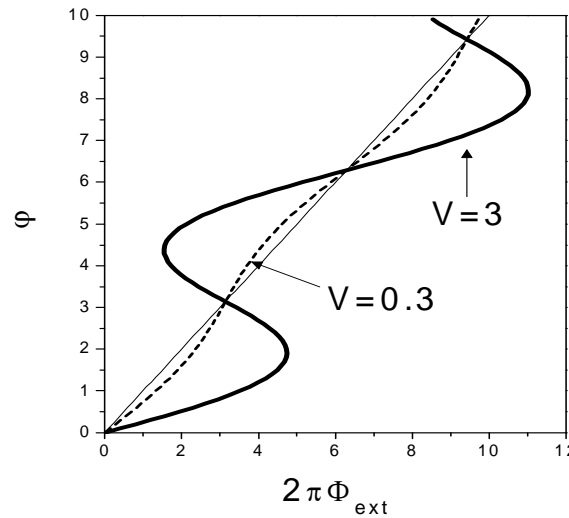
$$I_c \sin \varphi + \frac{\Phi_0}{2\pi\rho} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Phi_{ext} - \Phi}{L}$$

$$V = \frac{2\pi L}{\Phi_0} I_c; \quad \varphi = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

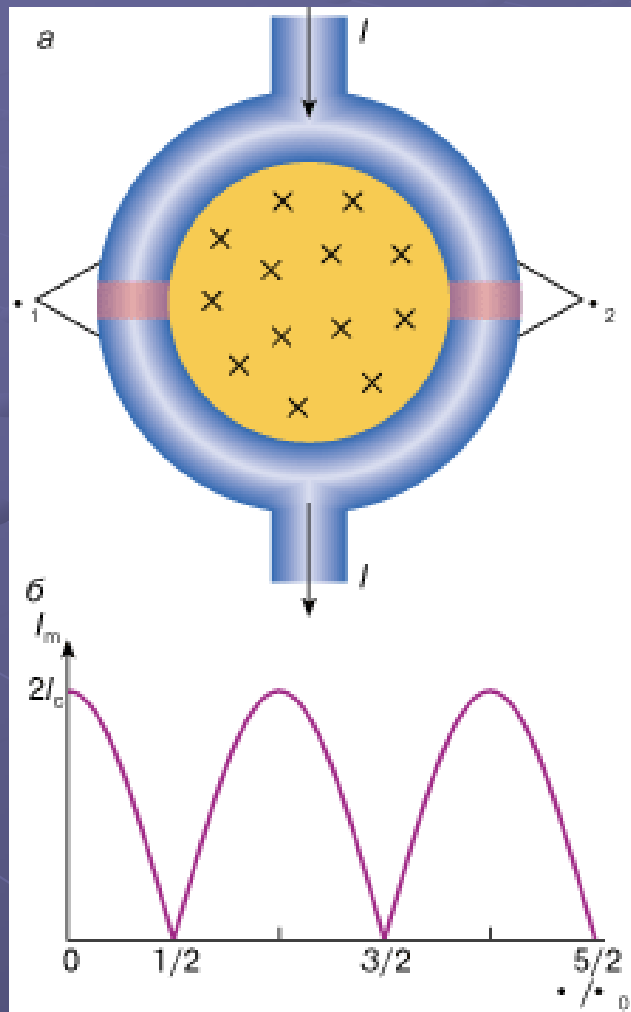
$$V = \frac{2\pi}{\Phi_0} (\Phi_{ext} - \Phi)$$

$$V = \frac{2\pi L}{\Phi_0} I_c$$

$$\Phi \approx n\Phi_0$$



Квантовая интерференция, СКВИДЫ

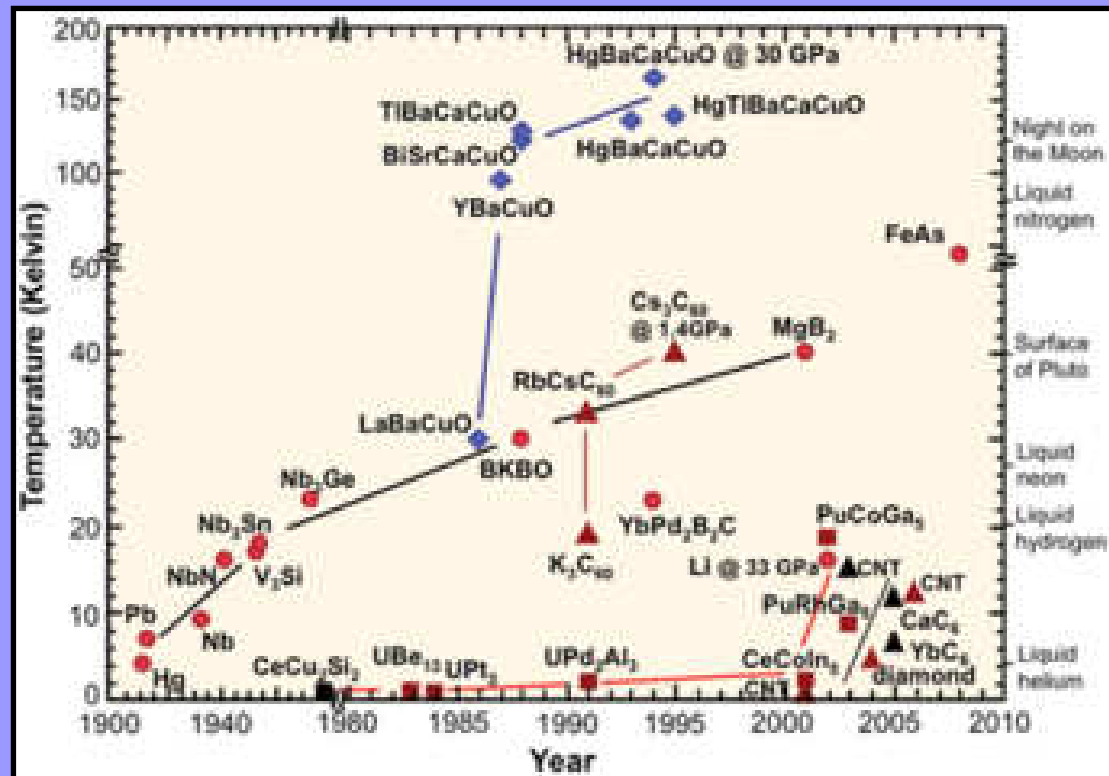


При отсутствии внешнего поля обе ветви СКВИДа эквивалентны. Поле индуцирует ток в кольце, который будет положителен в одном из контактов и отрицателен – в другом. Тогда ток в СКВИДе может изменяться от нуля (когда токи, идущие от двух переходов, взаимно гасятся) до максимума (когда они однонаправлены и усиливают друг друга). СКВИД – сверхточный прибор для измерения магнитного поля.

Преимущества и сложности сверхпроводников

- Низкие энергетические потери
- Компактность
- Управляемость
- Нелинейные свойств

НО!

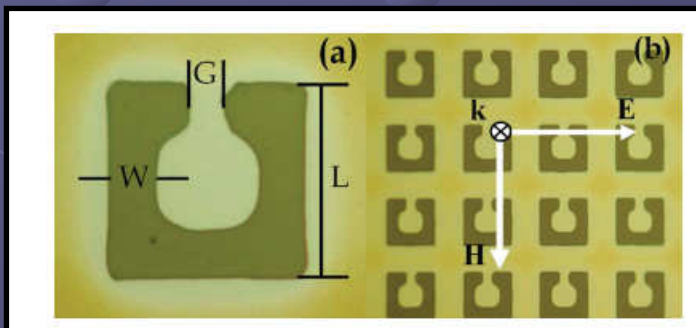


- **Ограничения, связанные с необходимостью охлаждения**

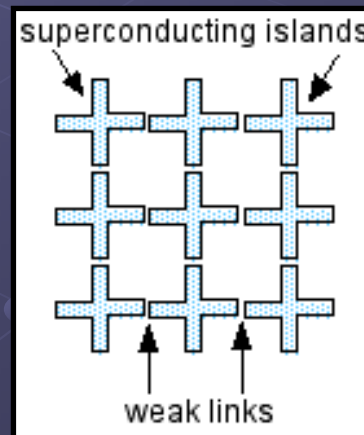
Сверхпроводящие метаматериалы

Сверхпроводящие метаматериалы – метаматериалы, в которых в качестве «атомов» выступают сверхпроводящие элементы.

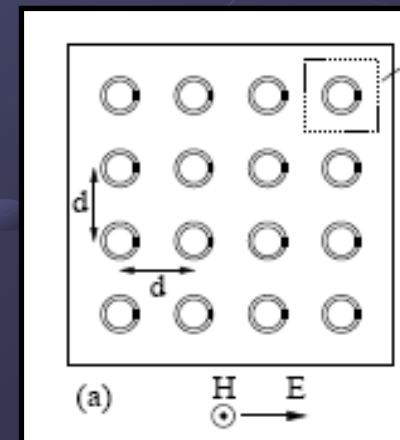
Метаматериалы на основе элементов из низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников



Решетки джозефсоновских контактов

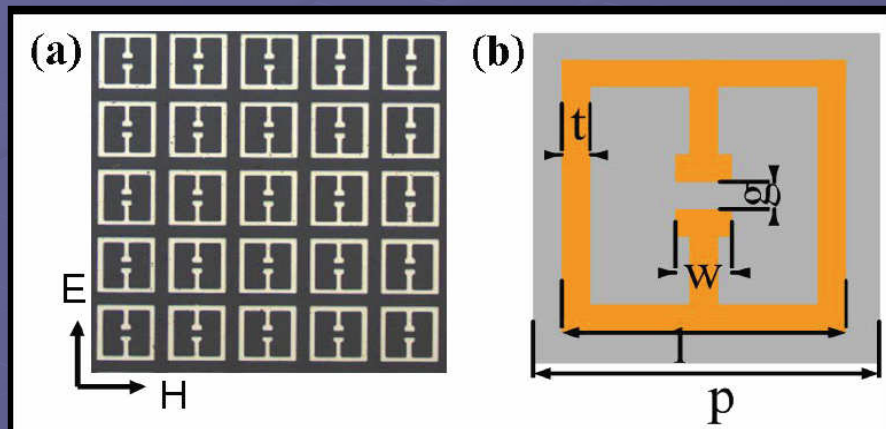


СКВИД-метаматериалы

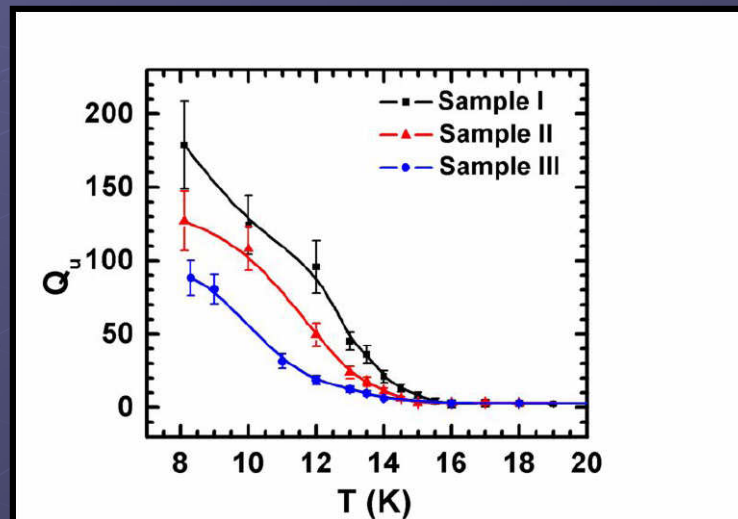


Виды сверхпроводящих метаматериалов

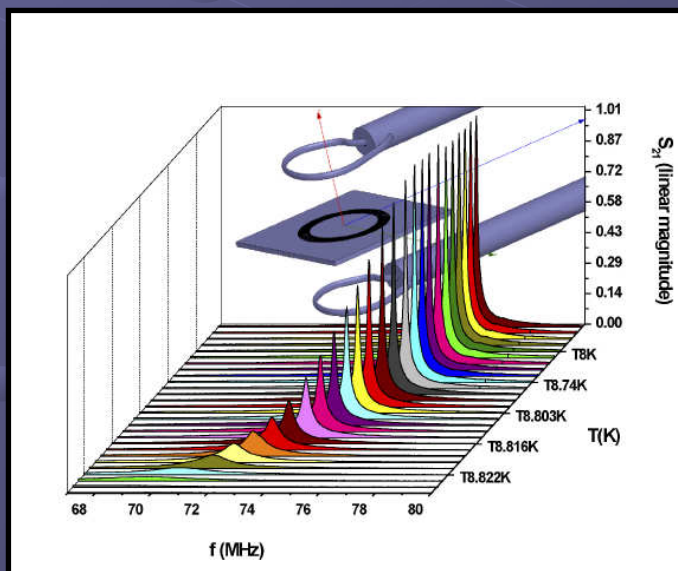
Сверхпроводники заменяют обычный металл



Метаматериал на основе NbN



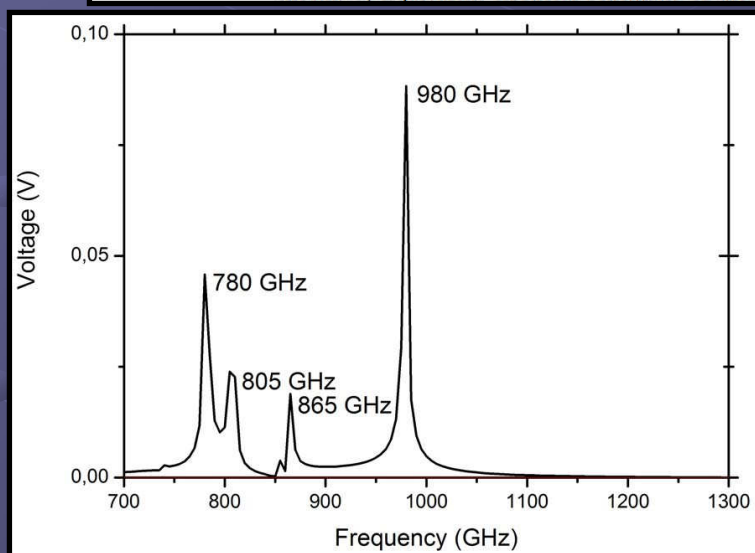
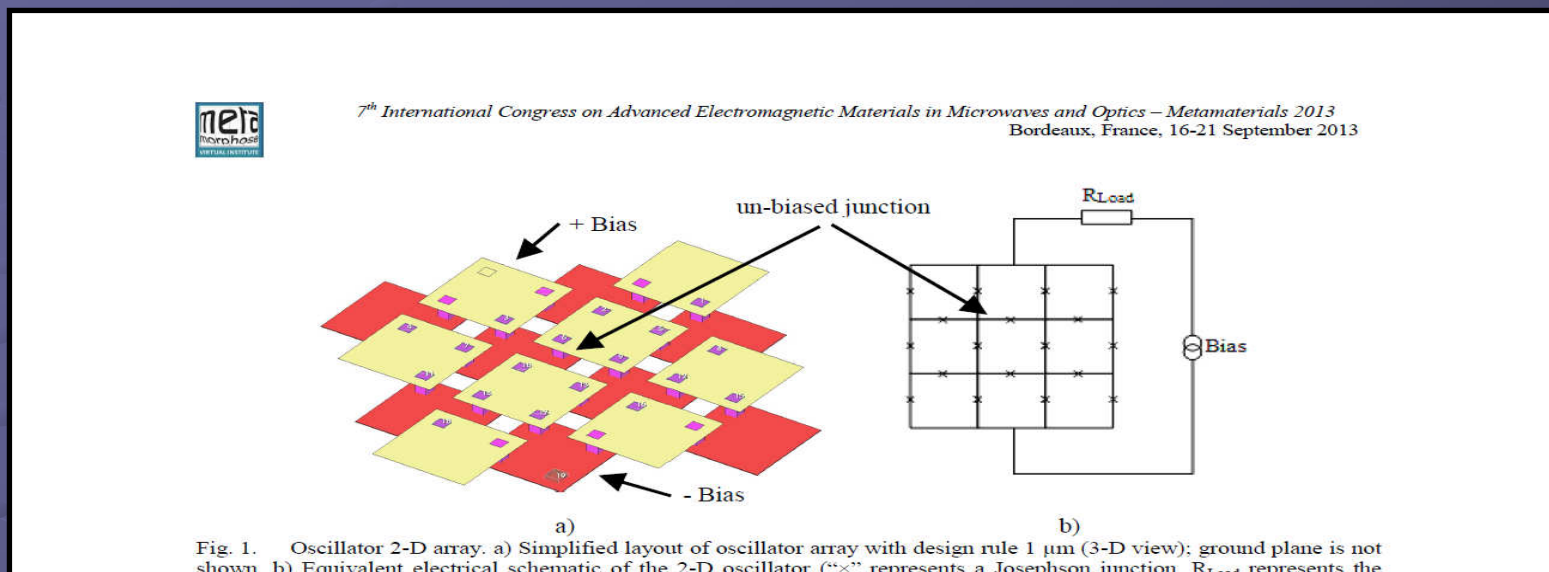
Добротность в 24 раза больше, чем у метаматериала на основе золота



Резонансная частота перестраивается при изменении температуры

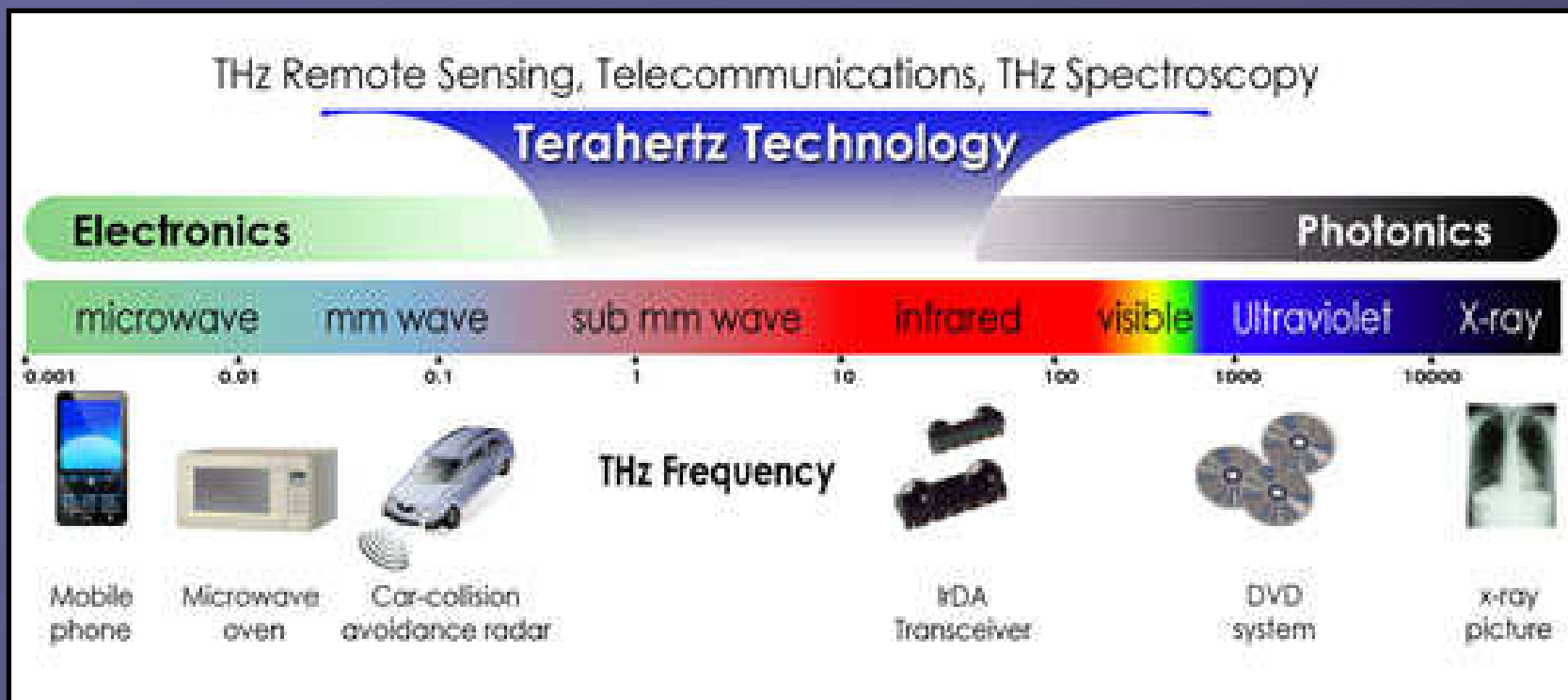
ВИДЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Метаматериалы на основе джозефсоновских контактов (решетки)



Еще одна возможность использования – работа в терагерцовом диапазоне частот (100 ГГц – 30 ТГц, длина волны между инфракрасным (0.01-0.3 см) и субмиллиметровым излучением (<1 мм))

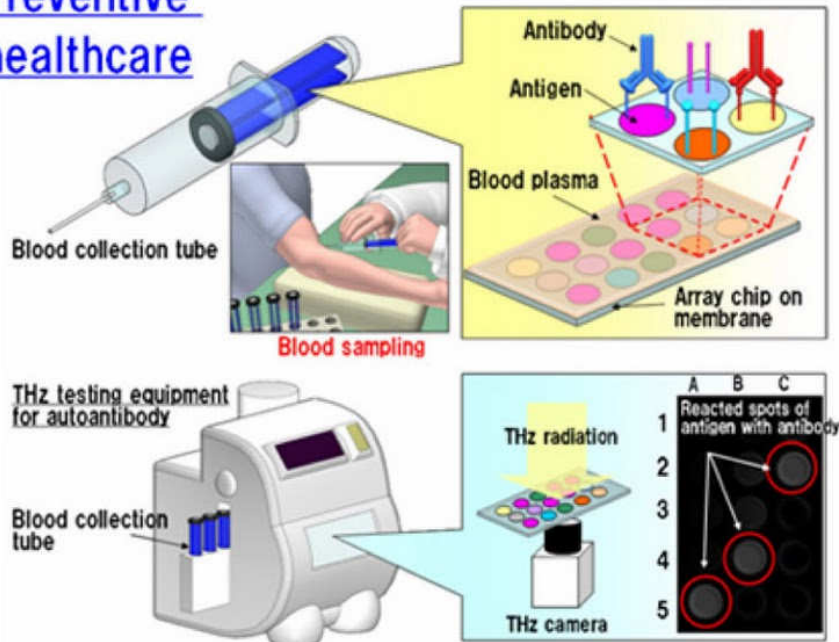
терагерцовое излучение



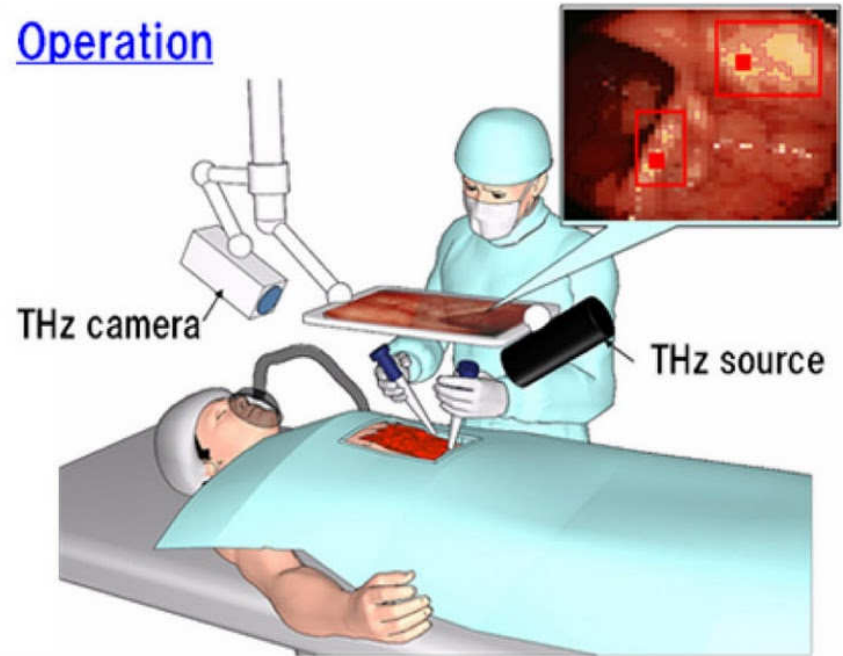
Т-лучи - не ионизирующие и способны пройти сквозь бумагу, одежду, картон, дерево, каменную кладку, пластик и керамику. Они проникают также в туман и облака, однако не могут глубоко проникнуть в металл и воду. У большинства биологических объектов есть так называемые "отпечатки пальцев" или спектральные особенности в терагерцовом частотном диапазоне.

Contribution of THz technology in a future (10 years)

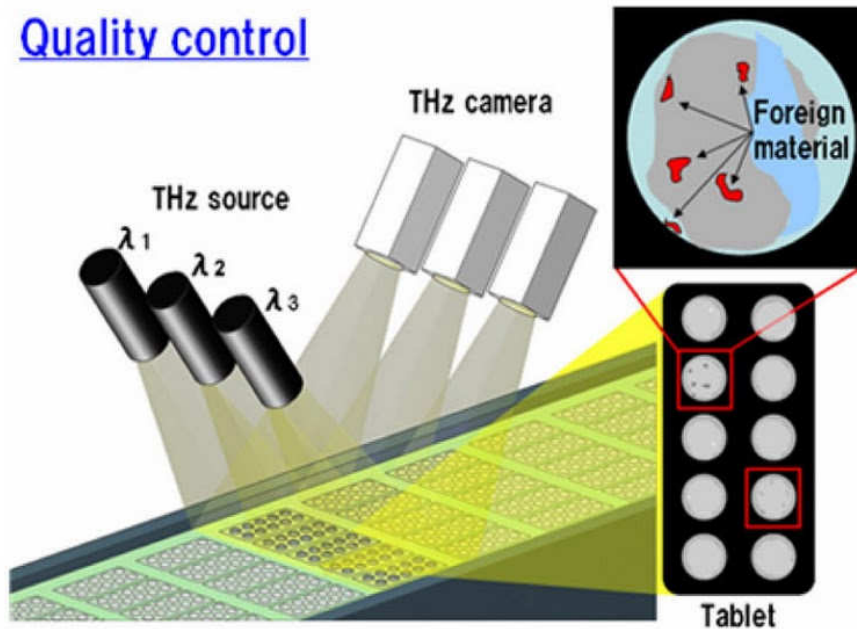
Preventive healthcare



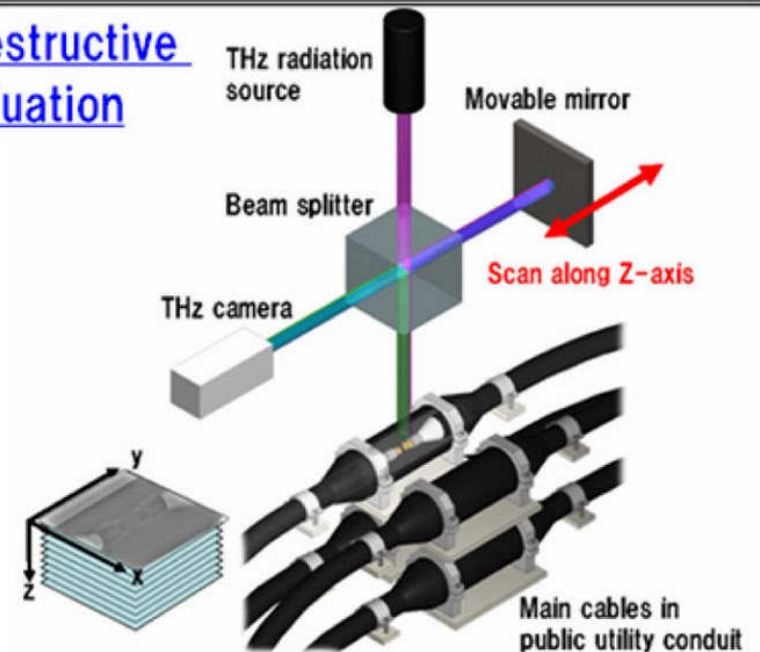
Operation



Quality control

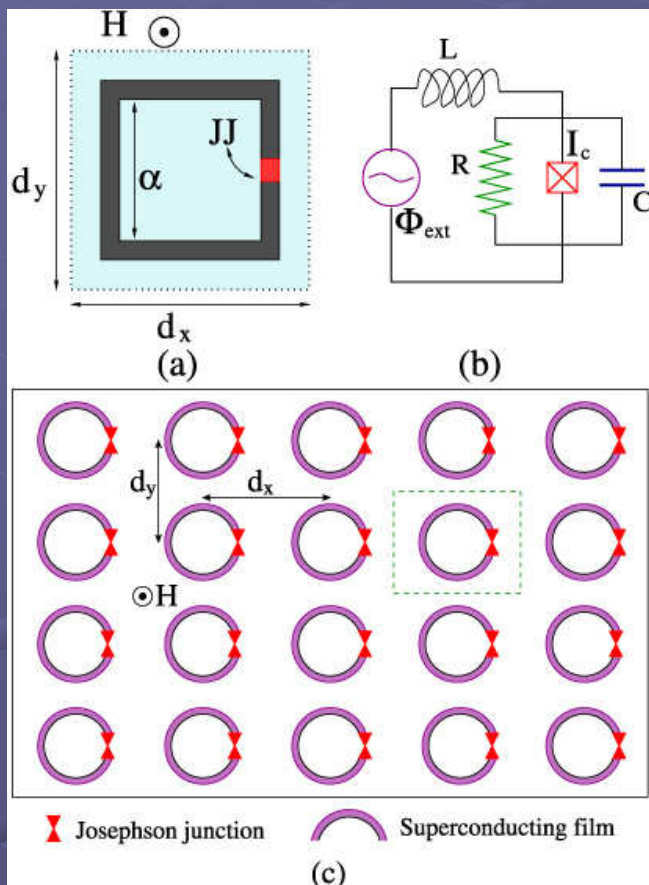


Non-destructive Evaluation

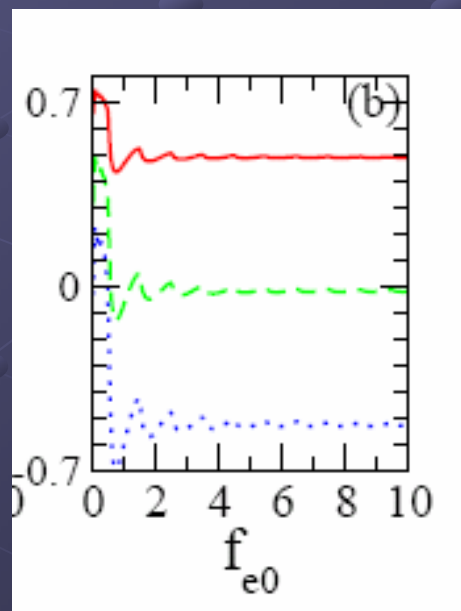


ВИДЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Метаматериалы на основе СКВИДов



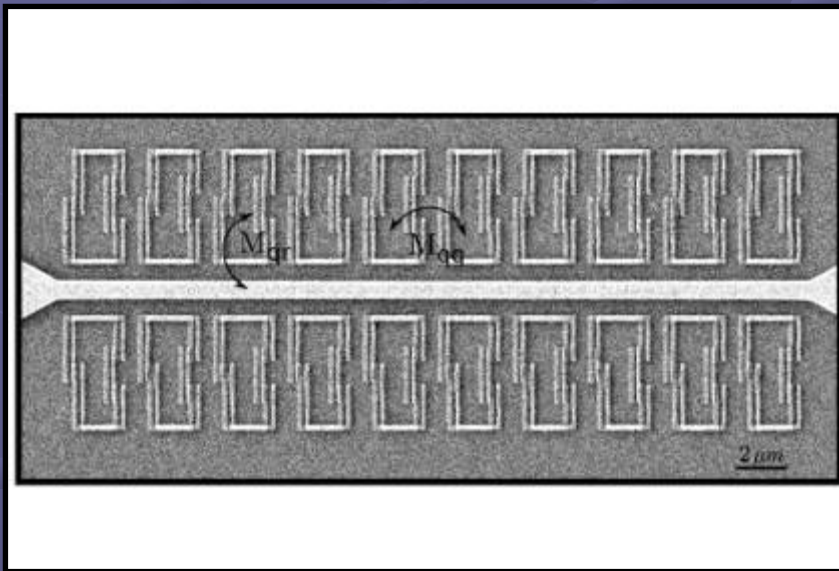
СКВИД – аналог разомкнутого кольцевого резонатора с джозефсоновским контактом вместо щели. Метаматериал на основе взаимодействующих СКВИДов - аналог нелинейной среды с отрицательной магнитной проницаемостью.



Сверхпроводящие метаматериалы. Дальнейшие перспективы

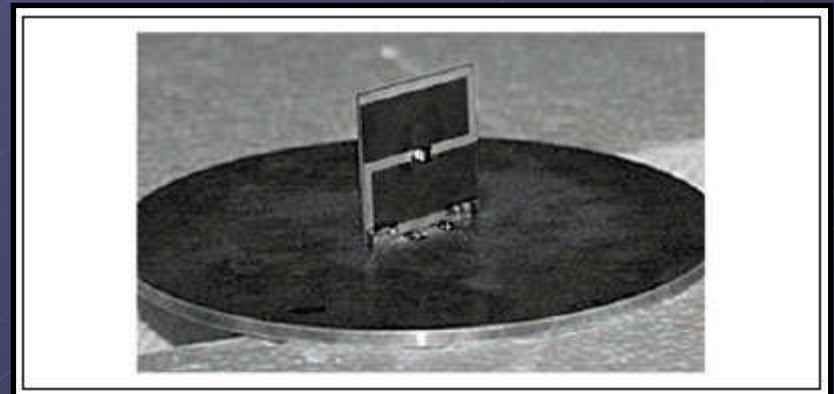
Квантовые метаматериалы
(детектирование одиночных фотонов)

(мега-грант «Сверхпроводящие метаматериалы»
МИСиС, рук. А.Устинов)



Сверхкомпактные антенны

уменьшение габаритов антенн,
выполненных на обычных материалах,
приводит к падению КПД и
существенному сужению рабочей полосы
частот.



«Зачем вычислять квантовые явления на
классических счетных машинах?» (с) Р. Фейнман

Выход: сверхпроводящий
метаматериал!

И многое-многое другое...

Tunability of Superconducting Metamaterials

Michael C. Ricci, Hua Xu, and Steven M. Anlage
*Center for Superconductivity, Department of Physics,
University of Maryland, College Park, MD 20742-4111*

Ruslan Prozorov
Ames Laboratory, Department of Physics & Astronomy, Iowa State University, Ames, IA 50011

Alexander P. Zhuravel
*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics & Engineering,
National Academy of Sciences of Ukraine, 61164 Kharkov, Ukraine*

Alexey V. Ustinov
Physics Institute III, University of Erlangen-Nuremberg, D-91508, Erlangen, Germany
(Dated: December 1, 2011)

rf SQUID metamaterials

N. Lazarides
*Department of Physics, University of Crete, and Institute of Electronic Structure and Laser,
Foundation for Research and Technology-Hellas, P. O. Box 2208, 71003 Heraklion, Greece,
and Department of Electrical Engineering, Technological Educational Institute of Crete,
P. O. Box 140, Stavromenos, 71500, Heraklion, Crete, Greece*

G. P. Tsironis
*Facultat de Fisica, Departament d'Estructura i Constituents de la Materia,
Universitat de Barcelona, Av. Diagonal 647, E-08028 Barcelona, Spain,
and Department of Physics, University of Crete, and Institute of Electronic Structure and Laser,
Foundation for Research and Technology-Hellas, P. O. Box 2208, 71003 Heraklion, Greece*

The Physics and Applications of Superconducting Metamaterials

Steven M. Anlage^{1,2}



Low-loss tunable metamaterials using superconducting circuits with Josephson junctions

P. Jung, S. Butz, S. V. Shitov, and A. V. Ustinov

Citation: *Appl. Phys. Lett.* **102**, 062601 (2013); doi: 10.1063/1.4792705

Invited Paper

Metamaterials: paving the way for terahertz technology

Jianqiang Gu^{1*}, Jianguang Han¹, Zhen Tian¹, Chunmei Ouyang¹, Mingxia He¹ and Weili Zhang^{1,2}

¹Center for Terahertz waves and College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, and the Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

Tianjin 300072, China

²School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma 74075, USA

*¹ Email: gjq@tju.edu.cn

(Received January 2, 2013)

From metamaterials to metadevices

Nikolay I. Zheludev^{1,2*} and Yuri S. Kivshar³