

**Взаимодействие
электромагнитного излучения
различных диапазонов с
тонкопленочными структурами**

Никифорова П. М., Богацкая А. В., Попов А. М.

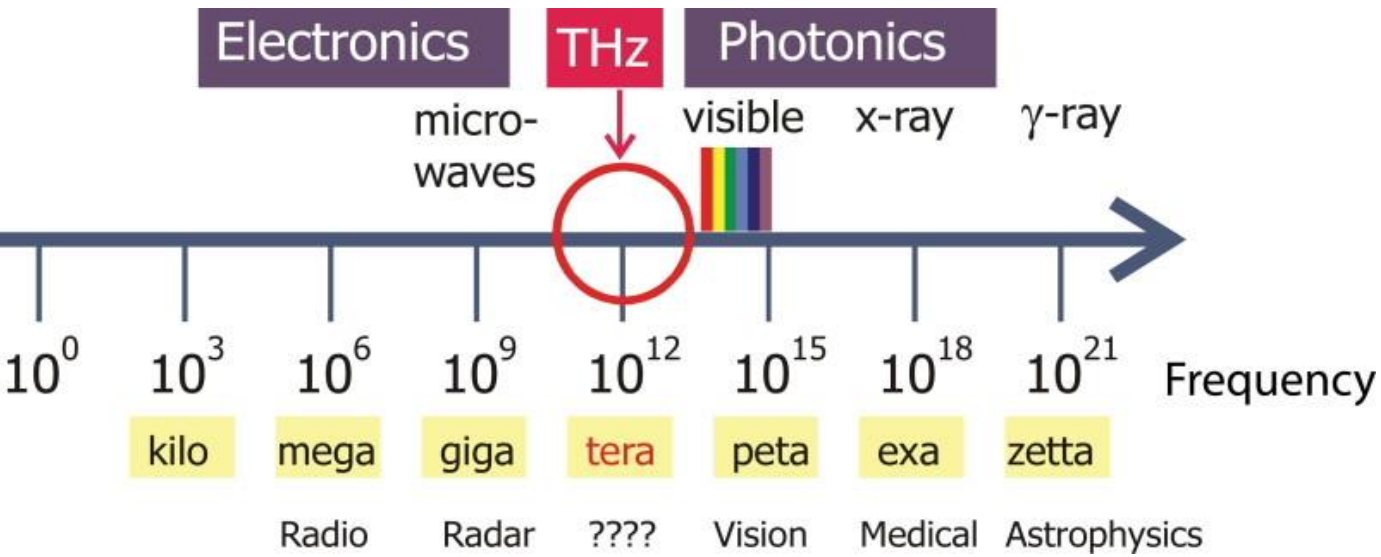
План

- **Введение. ТГц диапазон**
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

ТГц диапазон

100 GHz to 10 THz or 3 mm to 30 μm

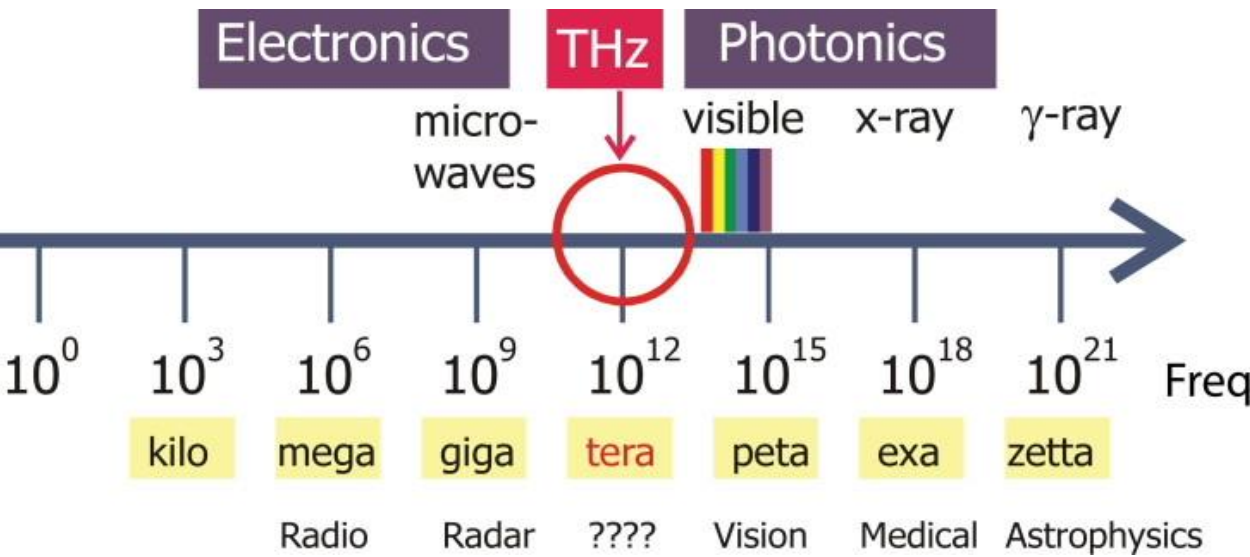
1 THz = 1 ps = 300 μm = 33 cm^{-1} = 4.1 meV = 48 K



ТГц диапазон

100 GHz to 10 THz or 3 mm to 30 μm

1 THz = 1 ps = 300 μm = 33 cm^{-1} = 4.1 meV = 48 K



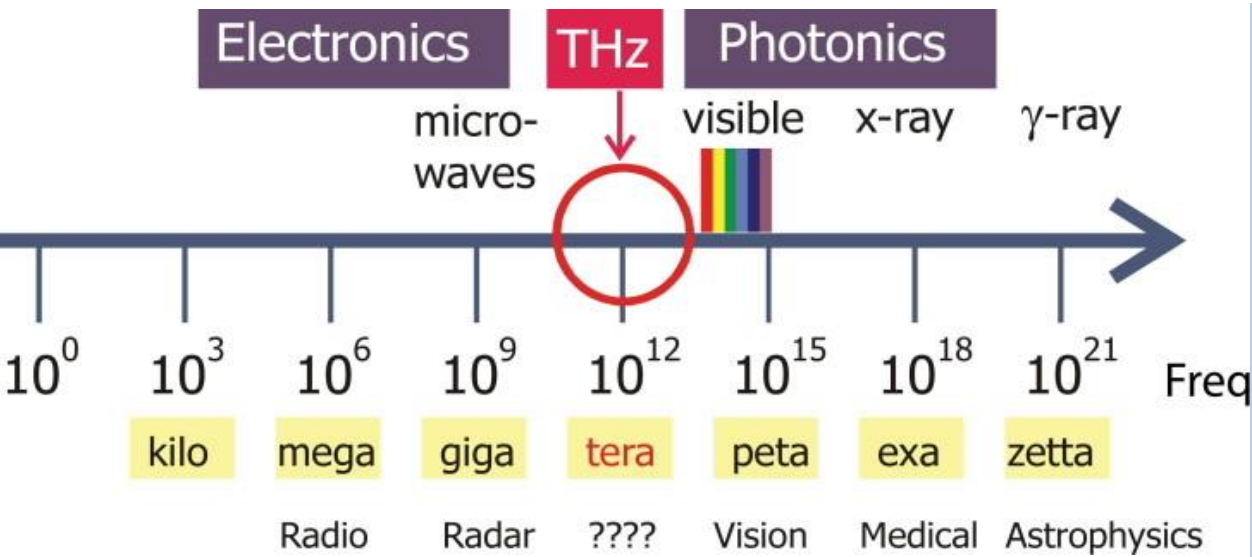
Особенности:

- легко проходят сквозь большинство диэлектриков
- но хорошо отражаются проводящими материалами
- поглощаются многими жидкостями (водой)

ТГц диапазон

100 GHz to 10 THz or 3 mm to 30 μm

1 THz = 1 ps = 300 μm = 33 cm^{-1} = 4.1 meV = 48 K



Особенности:

- легко проходят сквозь большинство диэлектриков
- но хорошо отражаются проводящими материалами
- поглощаются многими жидкостями (водой)

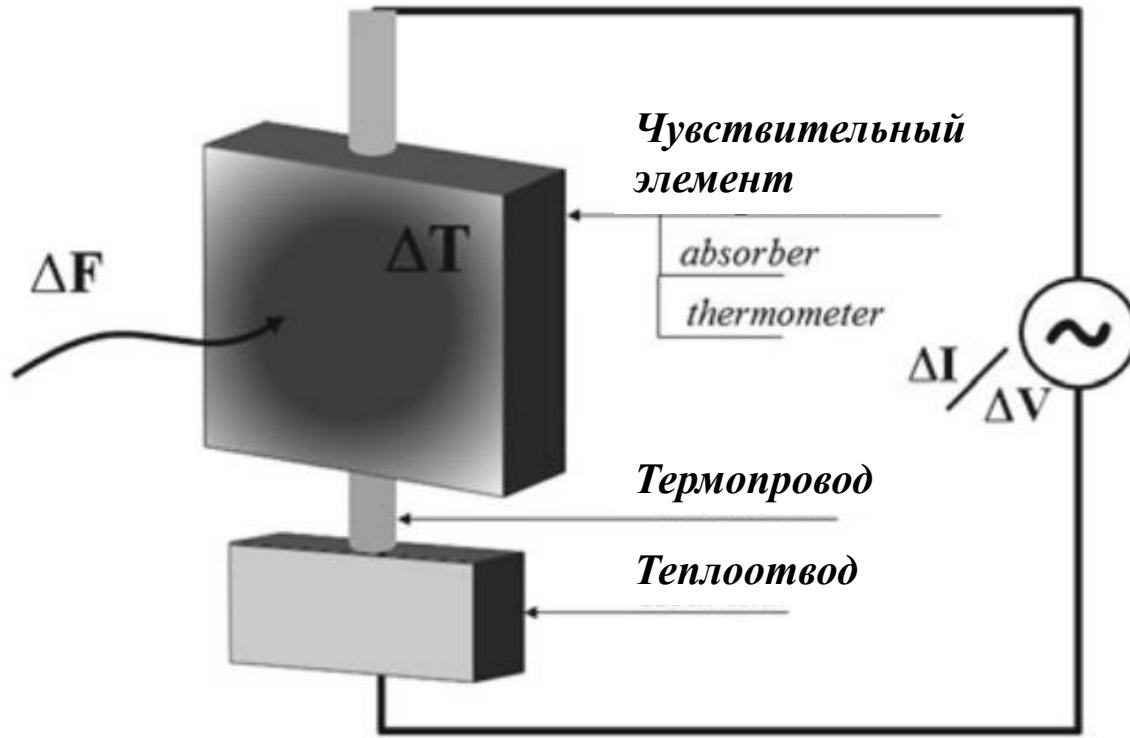
Применение ТГц технологий:

- **Системы связи** (беспроводные широкополосные высокоскоростные, 6G)
- **Медицина** (томография)
- **Безопасность** (обнаружение предметов, скрытых за препятствиями)
- **Спектроскопия** (изучение физико-химических свойств некоторых жидкостей и твёрдых материалов)
- **Астрофизика** (изучение фонового космического излучения)
- **Компьютерная память** (переключение ячеек компьютерной памяти не магнитными полями, а ТГц импульсами)

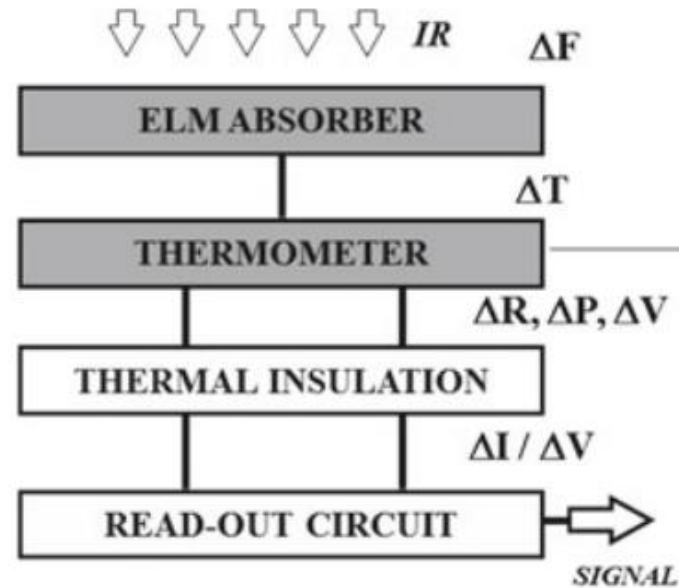
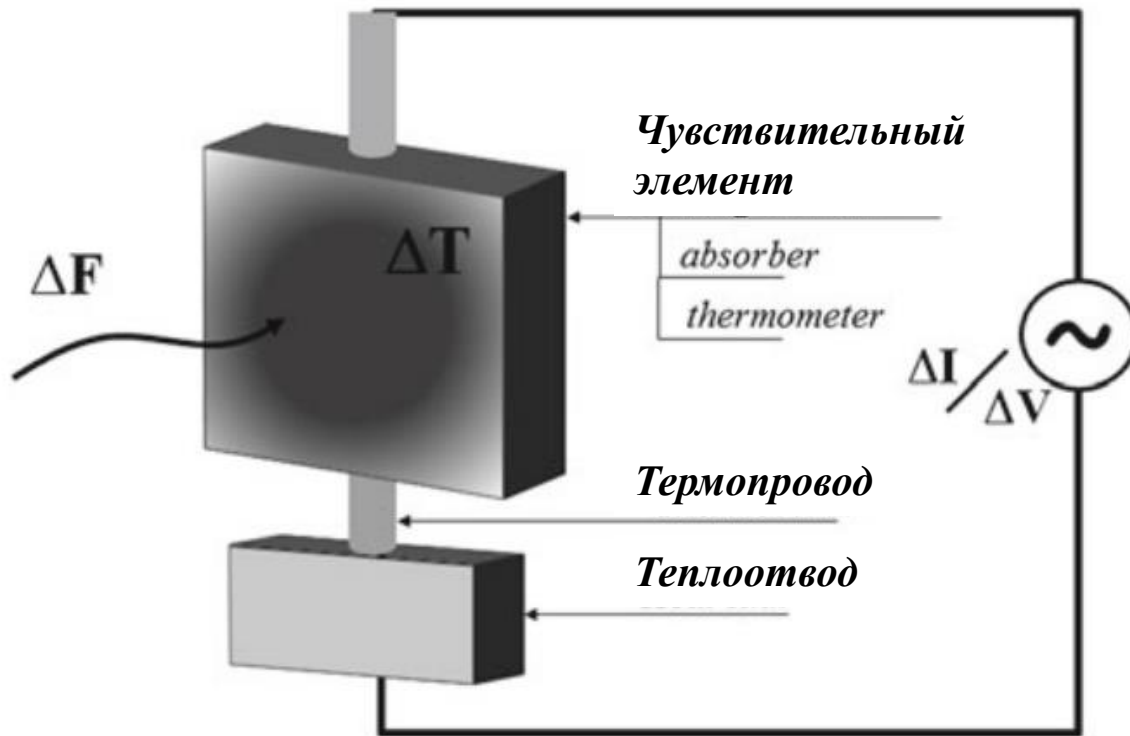
План

- Введение. ТГц диапазон
- **Болометрическое детектирование ТГц излучения**
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

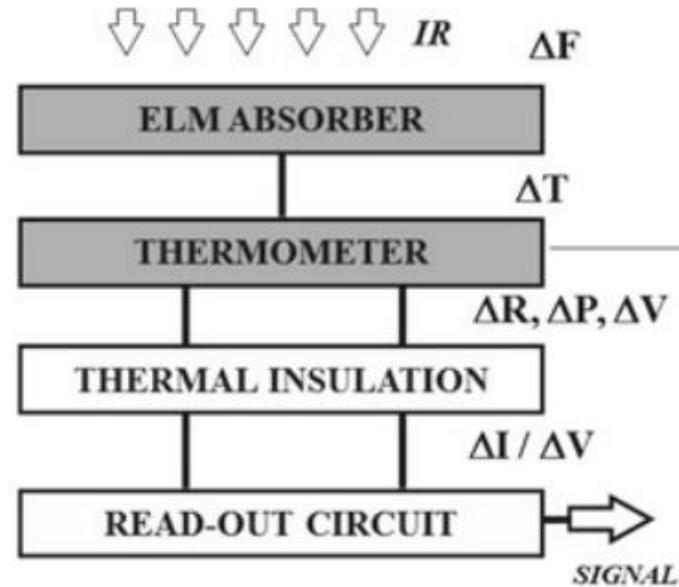
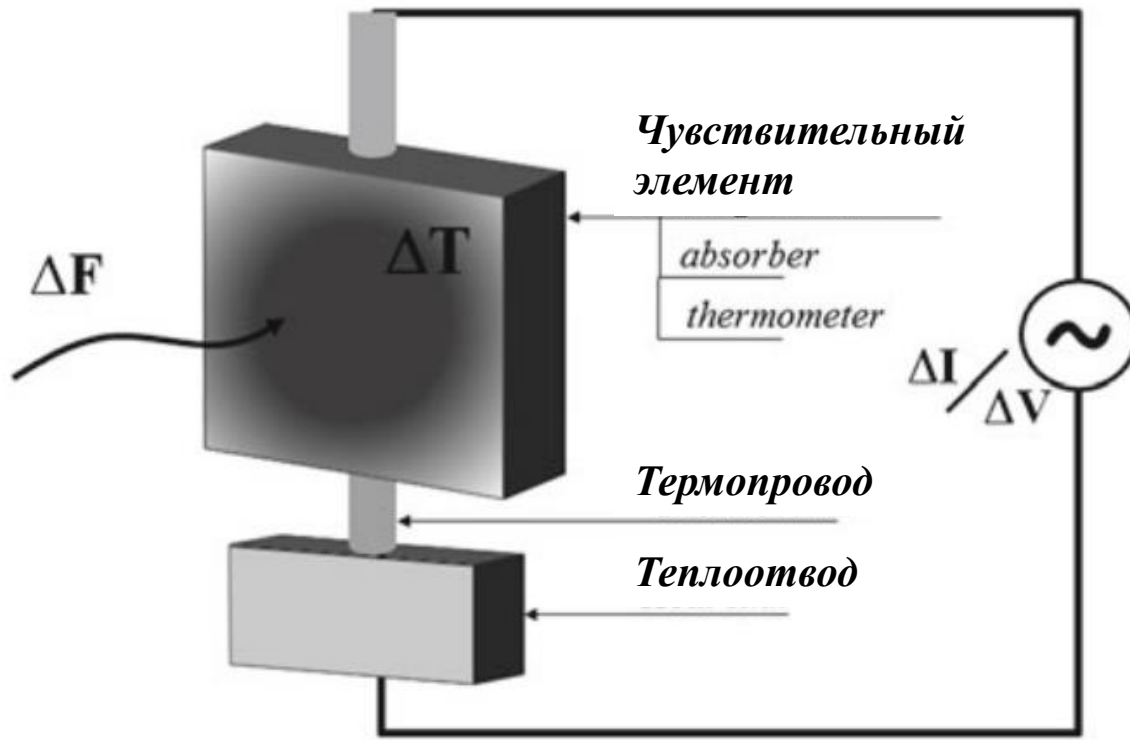
Болометрический детектор



Болометрический детектор



Болометрический детектор



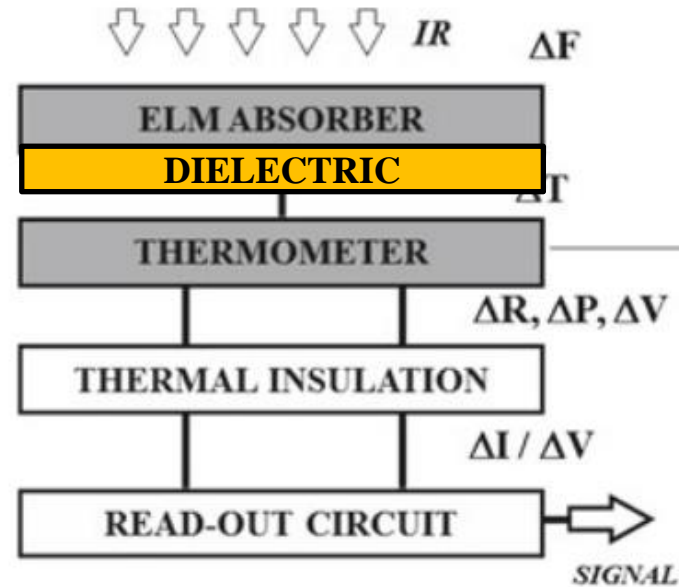
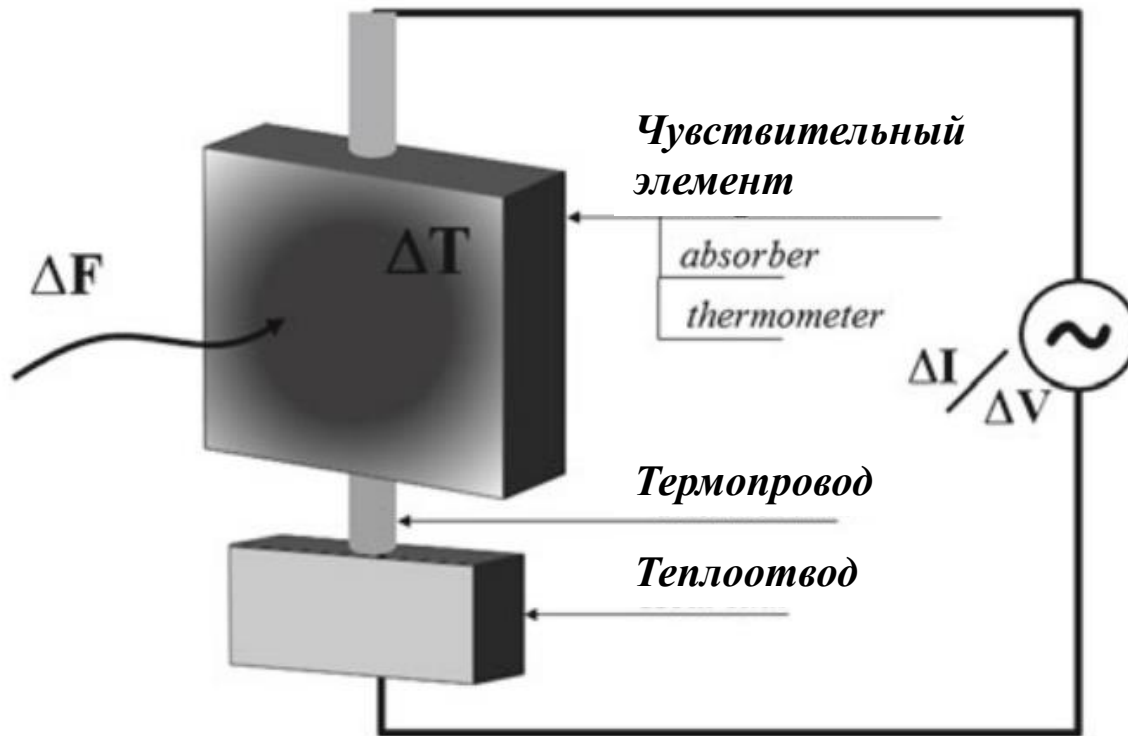
Преимущества:

- низкая стоимость
- снижение энергопотребления и веса детектора
- простота изготовления

Недостатки:

- низкая чувствительность

Болометрический детектор



Преимущества:

- низкая стоимость
- снижение энергопотребления и веса детектора
- простота изготовления

Недостатки:

- низкая чувствительность

План

- Введение. ТГц диапазон
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

Оптико-механическая аналогия

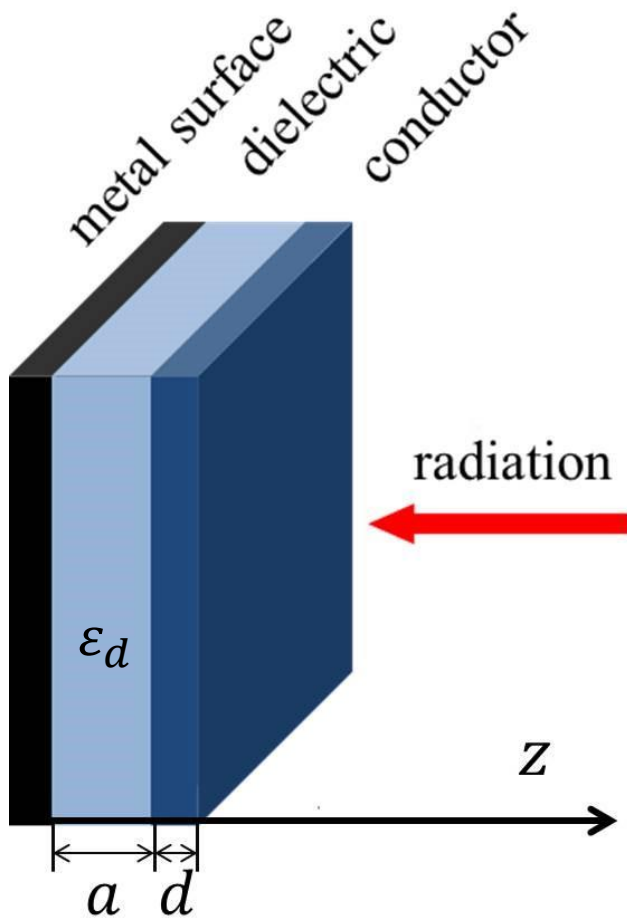
Шварцбург, А.Б. // УФН (2007)

The Helmholtz equation	The time-independent Schrödinger equation
$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + \kappa^2 \varepsilon_\omega(z) E(z) = 0$	$\frac{d^2 \psi}{dz^2} + k^2 \left(1 - \frac{V(z)}{\xi} \right) \psi = 0$
$\kappa^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$	$k^2 = \frac{2m\xi}{\hbar^2}$
$1 - \varepsilon_\omega(z) \leftrightarrow V(z)$	

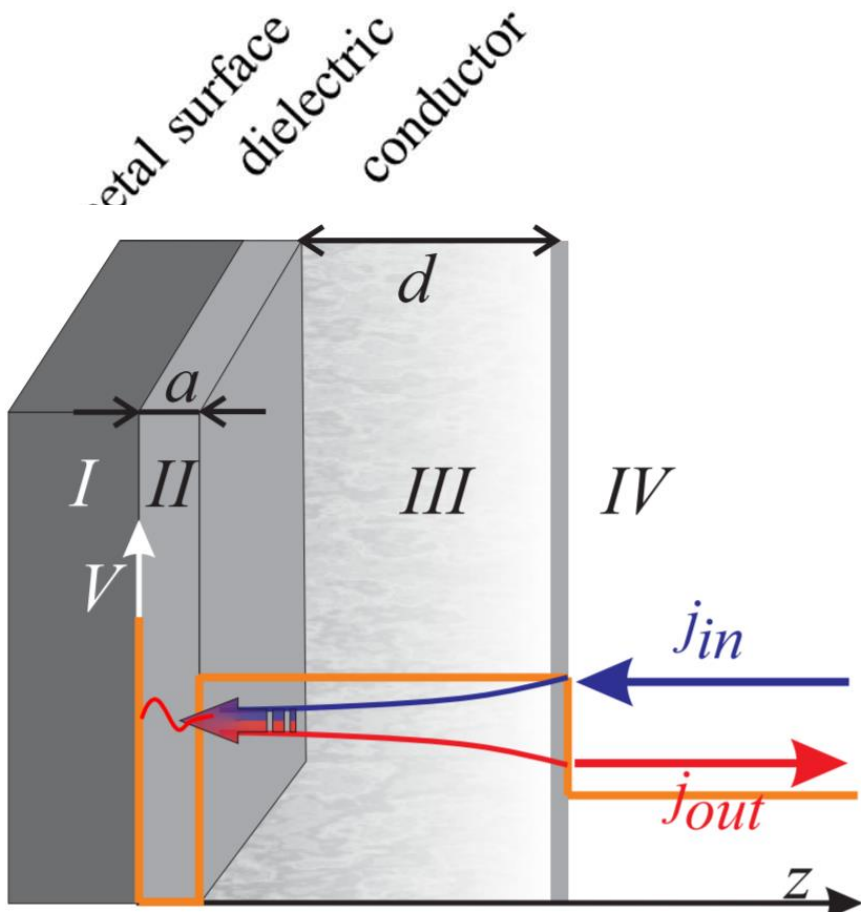
dielectric medium with $\varepsilon > 0 \leftrightarrow$ the potential well $V < 0$

dielectric medium with $\varepsilon < 0 \leftrightarrow$ the potential barrier $V < 0$

Резонансная структура «диэлектрик-металл»



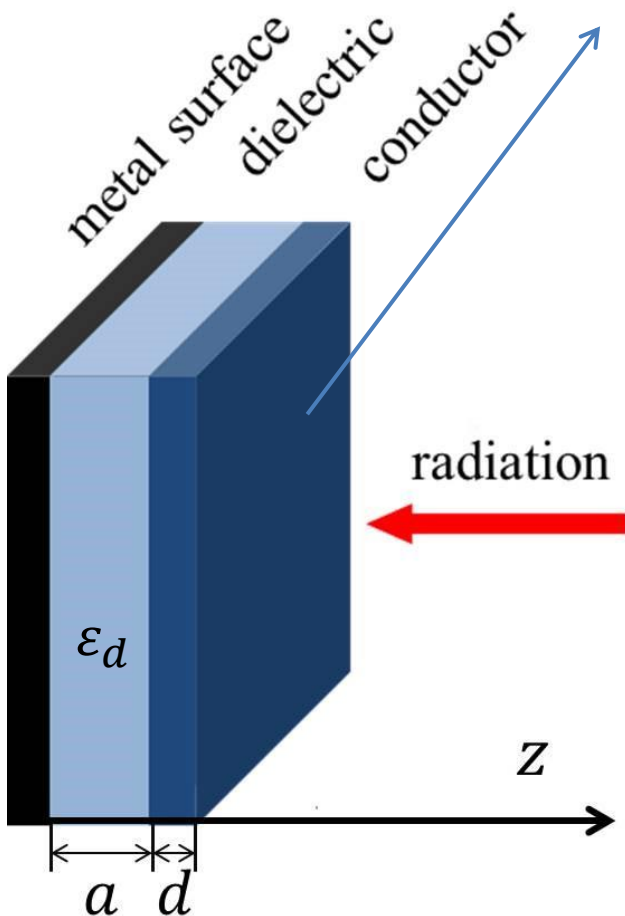
Резонансная структура «диэлектрик-металл»



Резонансная структура «диэлектрик-металл»

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + k_0^2 \epsilon_\omega(z) E(z) = 0$$

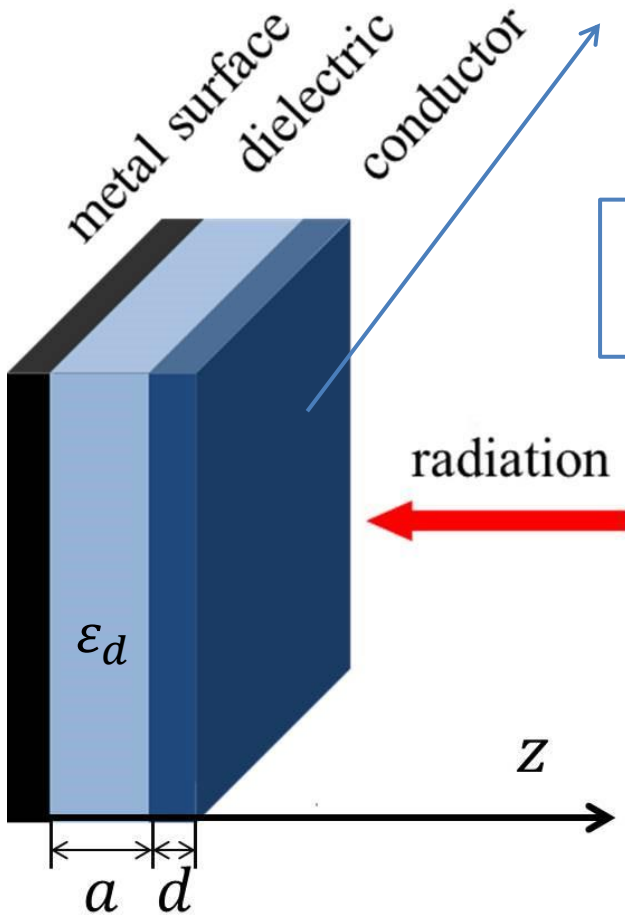
$$\epsilon_\omega = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \nu^2)} \frac{\nu}{\omega}$$



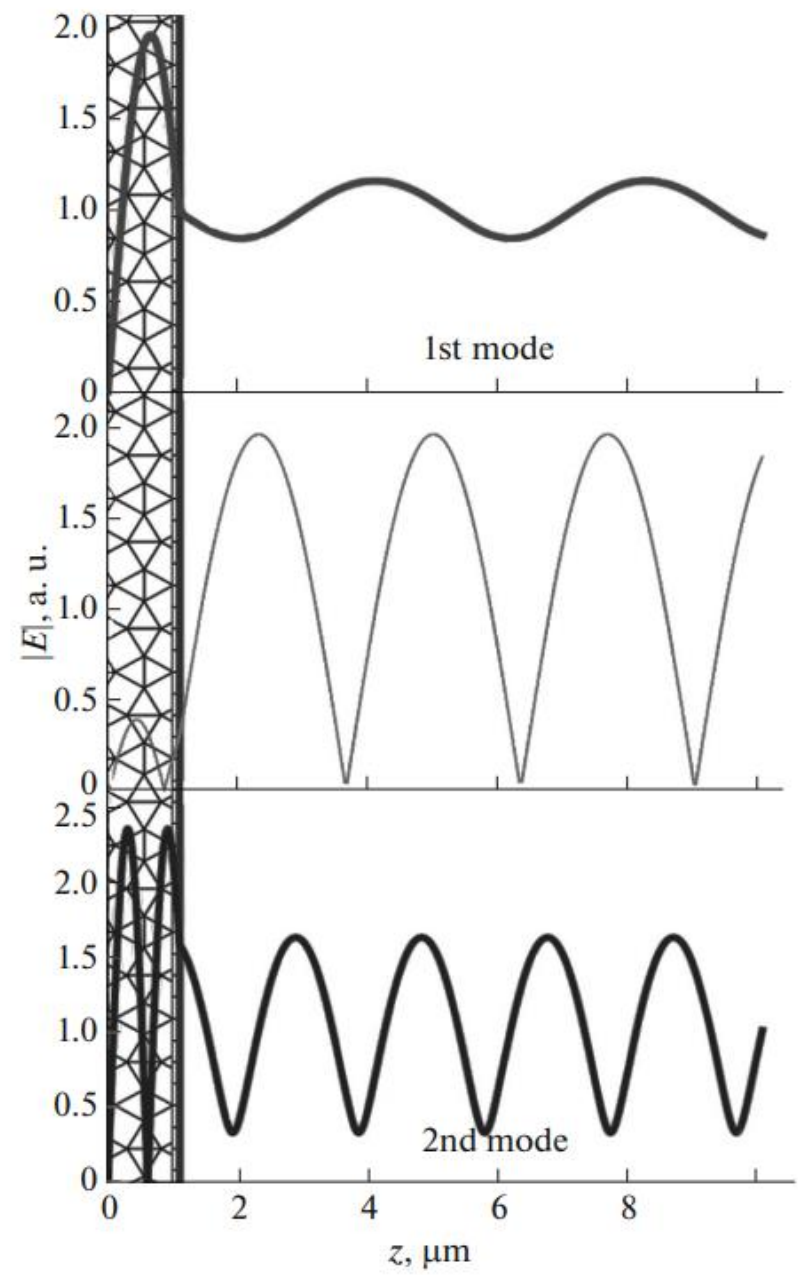
Резонансная структура «диэлектрик-металл»

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + k_0^2 \epsilon_\omega(z) E(z) = 0$$

$$\epsilon_\omega = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \nu^2)} \frac{\nu}{\omega}$$



$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$



Резонансная структура «диэлектрик-металл»

$$F = \max \frac{|E_d|^2}{|E_0|^2}$$

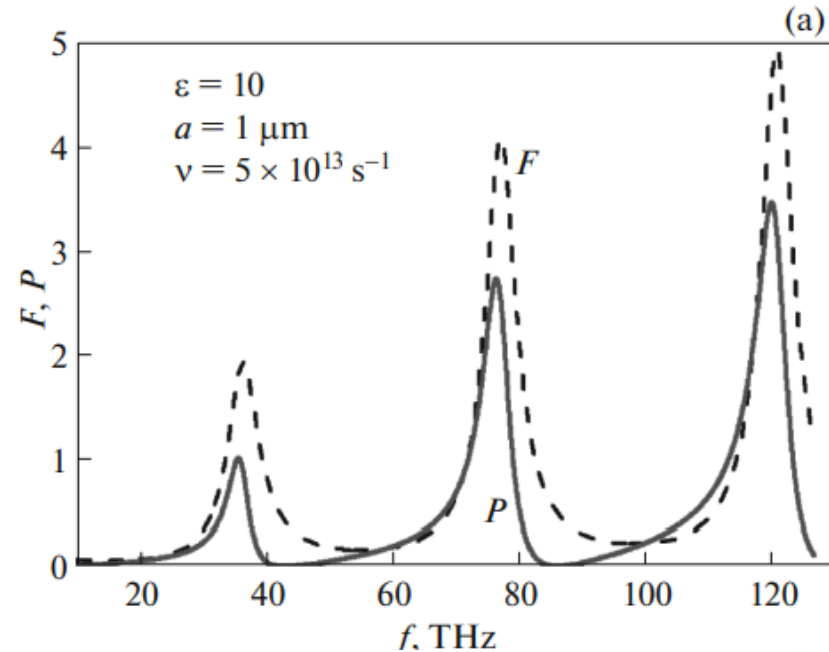
$$P = \max \frac{|E_m|^2}{|E_0|^2}$$

E_0 – амплитуда падающей волны

E_d – напряженность электромагнитного поля в диэлектрике

E_m – напряженность электромагнитного поля в металле

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$



Резонансная структура «диэлектрик-металл»

$$F = \max \frac{|E_d|^2}{|E_0|^2}$$

$$P = \max \frac{|E_m|^2}{|E_0|^2}$$

E_0 – амплитуда падающей волны

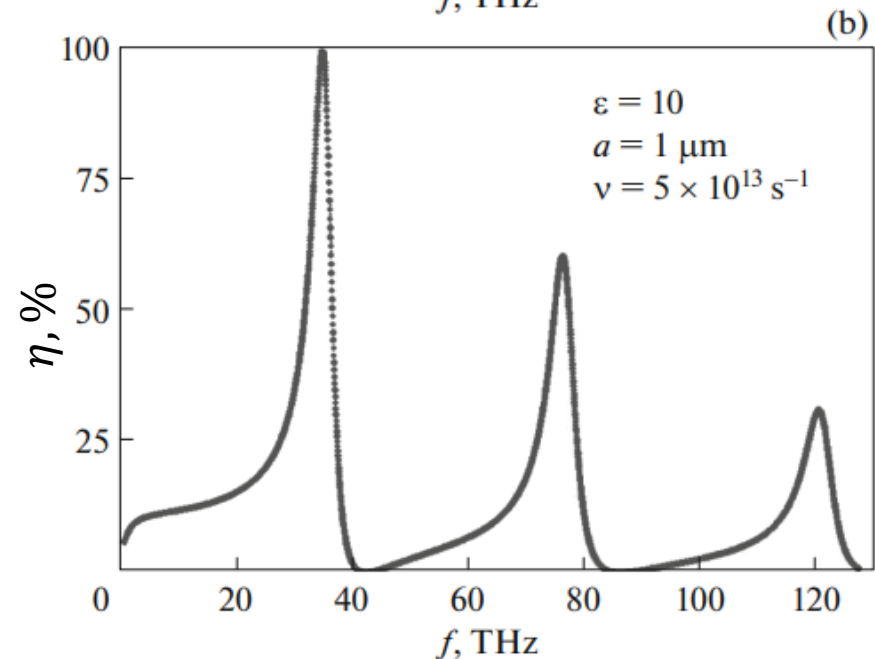
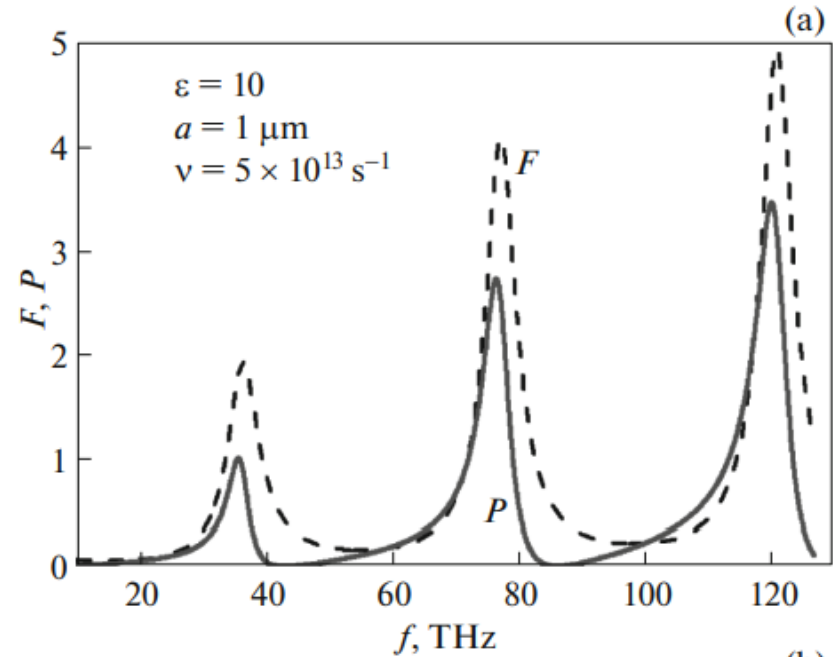
E_d – напряженность электромагнитного поля в диэлектрике

E_m – напряженность электромагнитного поля в металле

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$

Поглощение:

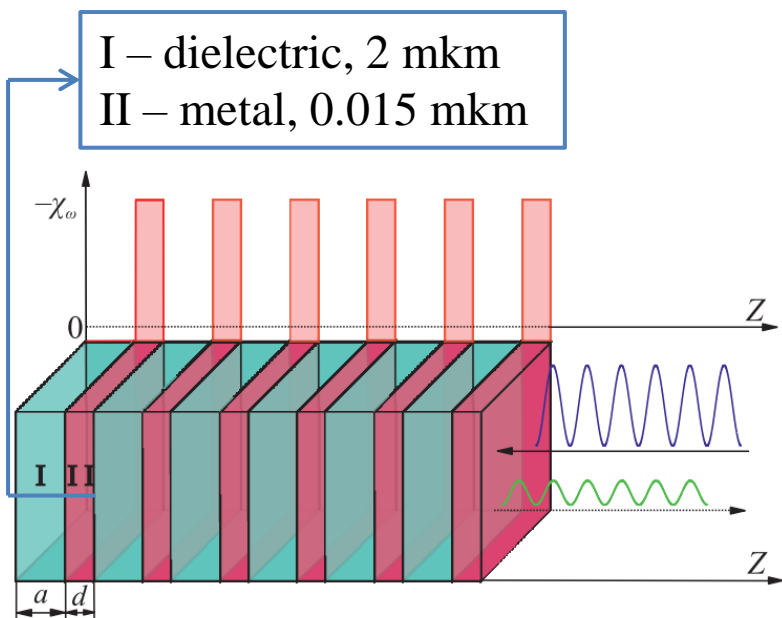
$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$



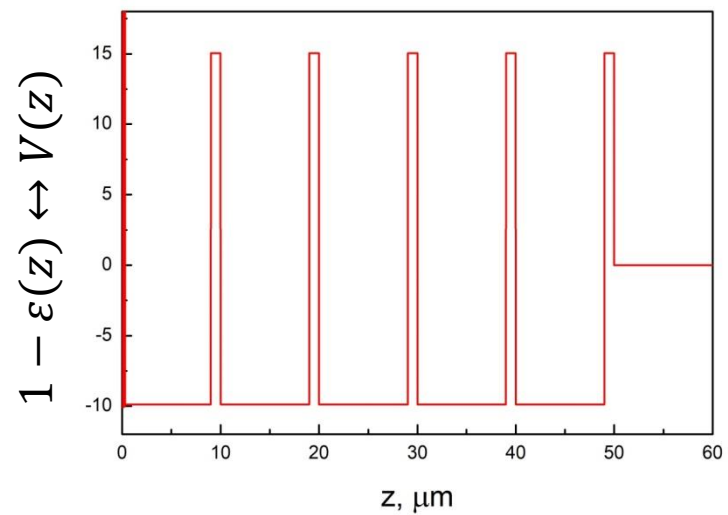
План

- Введение. ТГц диапазон
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

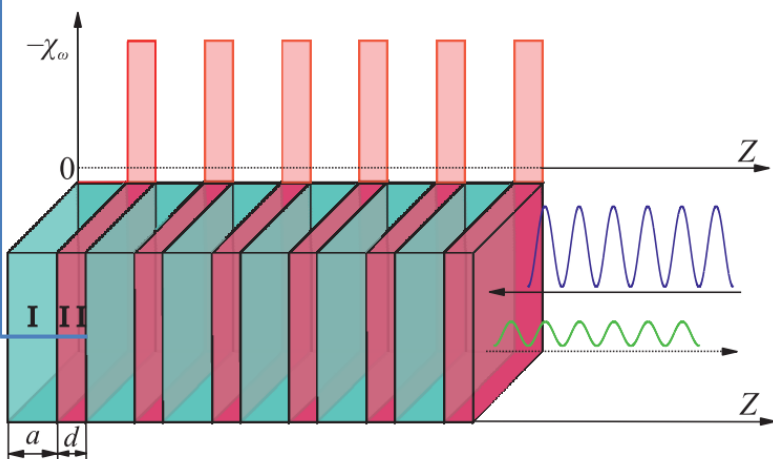
Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-металл»



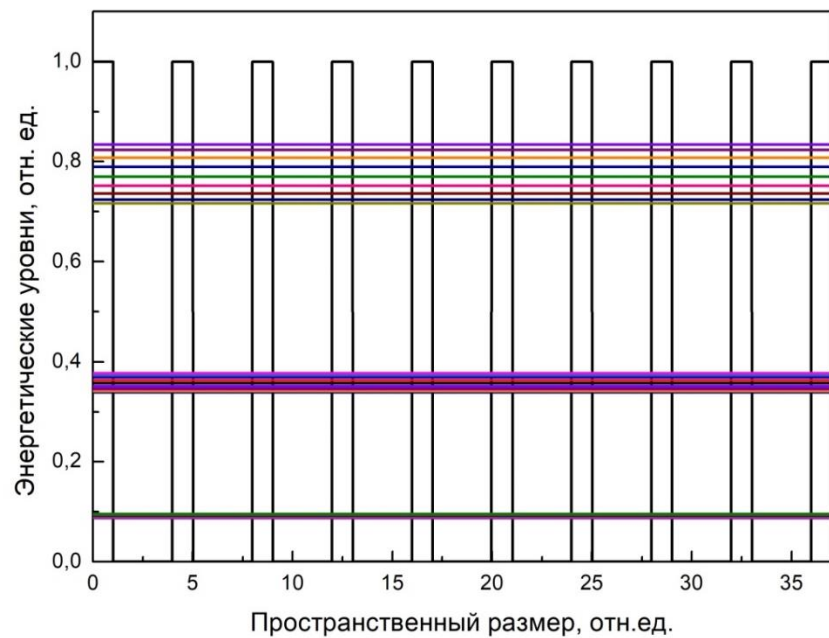
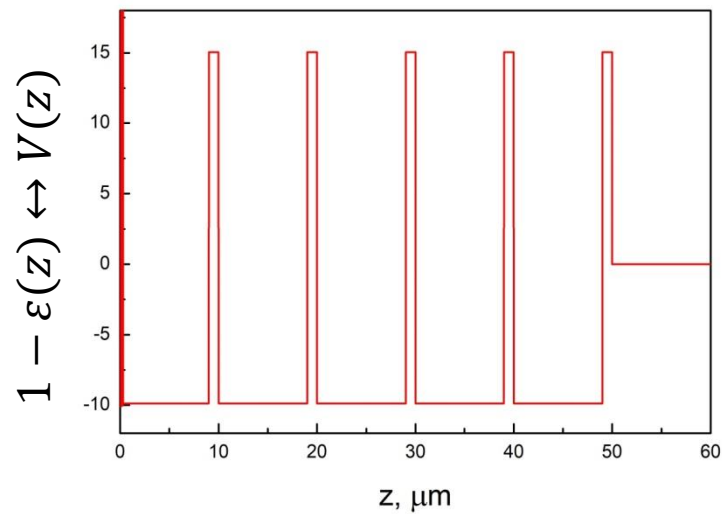
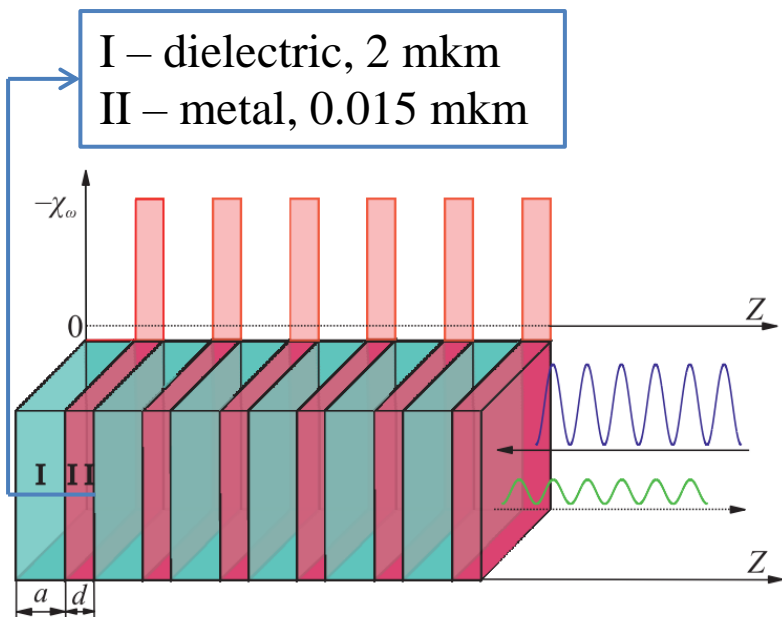
Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-металл»



I – dielectric, 2 mkm
II – metal, 0.015 mkm



Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-металл»

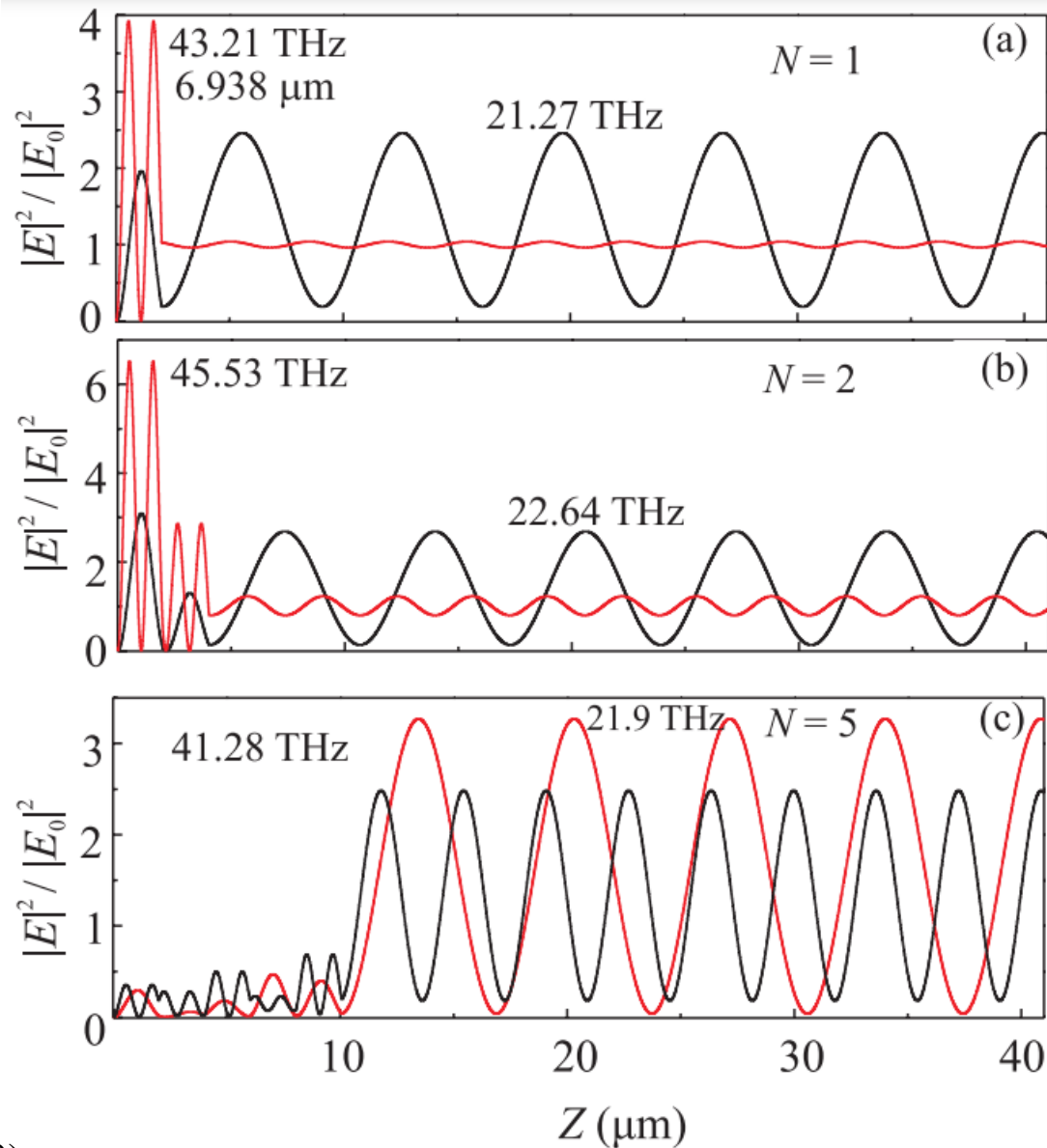
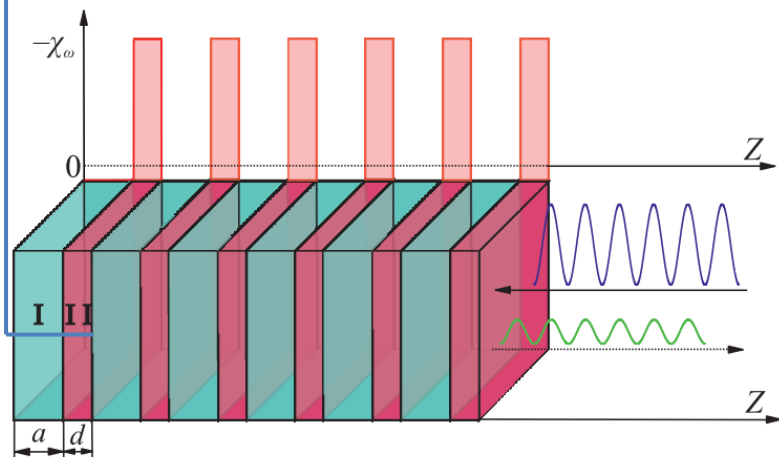


Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-металл»

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + k_0^2 \epsilon_\omega(z) E(z) = 0$$

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$

I – dielectric, 2 mkm
II – metal, 0.015 mkm



Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-металл»

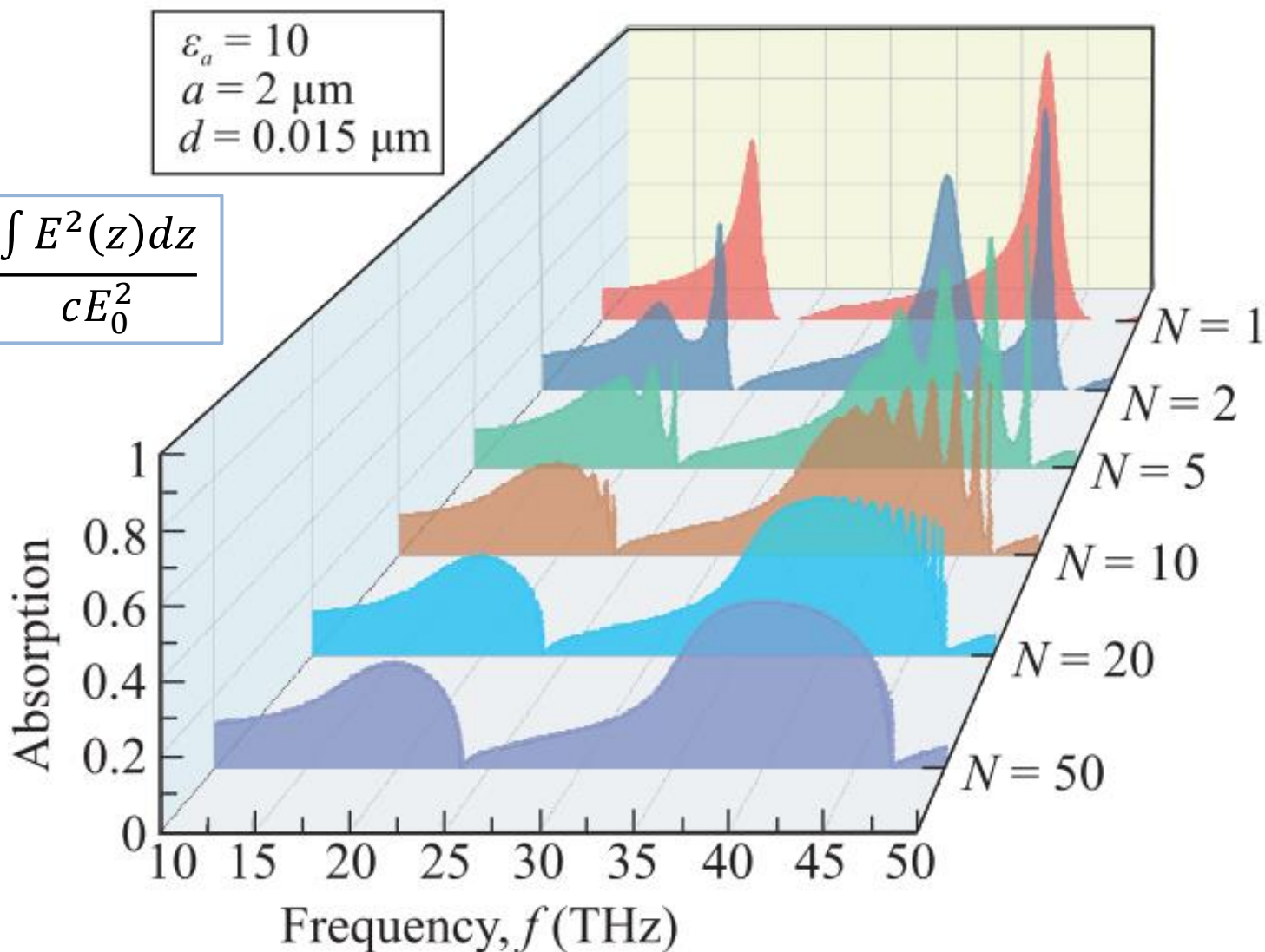
Поглощение:

$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$

$$\omega_p = 10^{16} \text{ c}^{-1}$$

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= 10 \\ a &= 2 \mu\text{m} \\ d &= 0.015 \mu\text{m} \end{aligned}$$



План

- Введение. ТГц диапазон
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

Широкополосное излучение. Периодическая структура «диэлектрик-проводник»

- Диэлектрик – нелегированный GaAs, 9 мкм
- Проводник – легированный GaAs, 1 мкм

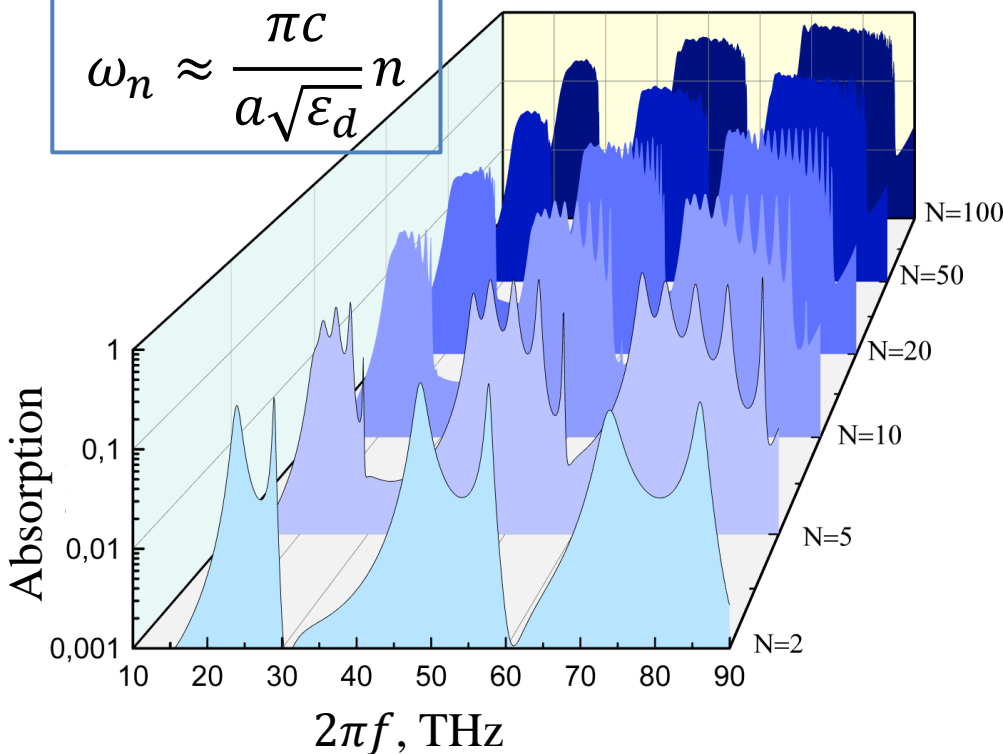
$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$

$$\varepsilon_d = 10.89$$

$$\nu = 3.1 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m^*} = 3 \cdot 10^{14}$$

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\varepsilon_d}} n$$



Широкополосное излучение. Периодическая структура

«диэлектрик-проводник»

- Диэлектрик – нелегированный GaAs, 9 мкм (150 мкм)
- Проводник – легированный GaAs, 1 мкм (0.5 мкм)

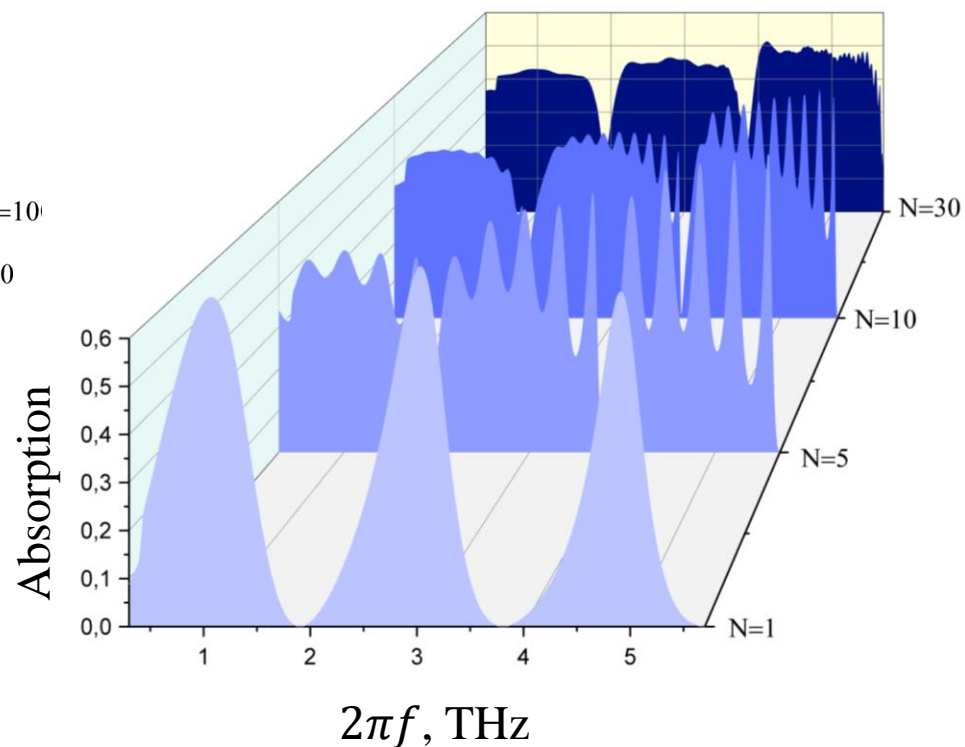
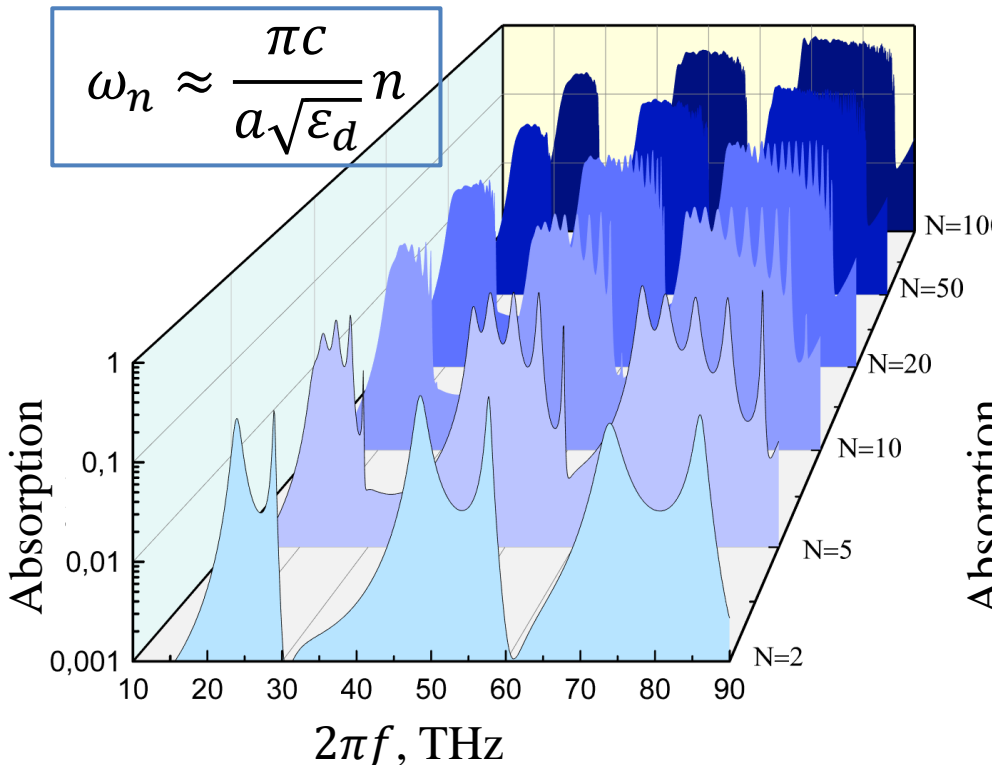
$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_d}} n$$

$$\epsilon_d = 10.89$$

$$\nu = 3.1 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m^*} = 3 \cdot 10^{14} (7 \cdot 10^{13}) \text{ s}^{-1}$$



Выводы

$N = 1$ dielectric layer
under the external
absorbing film of
bolometer



Effective filling of the
resonator by wave-field
for resonant frequencies



Narrow resonant
absorption peaks for
these frequencies

$N \gg 1$ dielectric layers
under the external
absorbing film of
bolometer



Band structure of field
modes (photonic crystal)



Band structure of the
absorption spectrum

План

- Введение. ТГц диапазон
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

Особенности распространение ЭМ сигналов в гетероструктурах «диэлектрик-проводник»

GaAs, Ge, Si: $\nu \sim 8 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

Особенности распространение ЭМ сигналов в гетероструктурах «диэлектрик-проводник»

GaAs, Ge, Si: $\nu \sim 8 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

$\nu \ll \omega \ll \omega_p$ (ИК)

$\omega \ll \nu \ll \omega_p$ (субТГц)

$$\varepsilon_\omega \approx \varepsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \leftarrow \varepsilon = \varepsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega},$$

$$-\frac{c^2}{\varepsilon_0} \frac{d^2 E(z)}{dz^2} - \frac{\omega_p^2}{\varepsilon_0} E(z) = \omega^2 E(z)$$

Особенности распространение ЭМ сигналов в гетероструктурах «диэлектрик-проводник»

GaAs, Ge, Si: $\nu \sim 8 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

$\nu \ll \omega \ll \omega_p$ (ИК)

$\omega \ll \nu \ll \omega_p$ (субТГц)

$$\varepsilon_\omega \approx \varepsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \leftarrow \varepsilon = \varepsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega}, \rightarrow \varepsilon_\omega \approx i \frac{\omega_p^2}{\nu \omega}$$

$$-\frac{c^2}{\varepsilon_0} \frac{d^2 E(z)}{dz^2} - \frac{\omega_p^2}{\varepsilon_0} E(z) = \omega^2 E(z)$$

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + i \frac{\omega \omega_p^2}{\nu c^2} E(z) = 0$$

Особенности распространение ЭМ сигналов в гетероструктурах «диэлектрик-проводник»

GaAs, Ge, Si: $\nu \sim 8 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

$\nu \ll \omega \ll \omega_p$ (ИК)

$\omega \ll \nu \ll \omega_p$ (субТГц)

$$\epsilon_\omega \approx \epsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$\epsilon = \epsilon_d - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega}$$

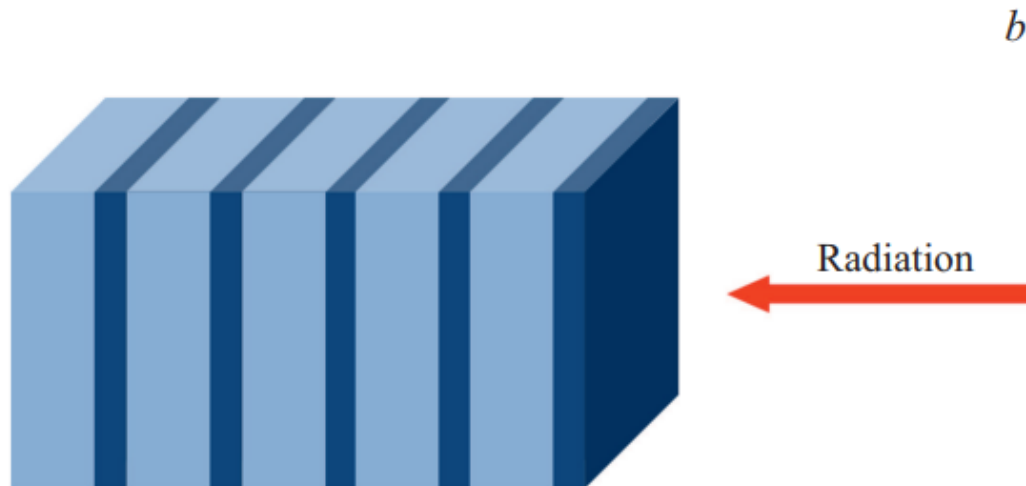
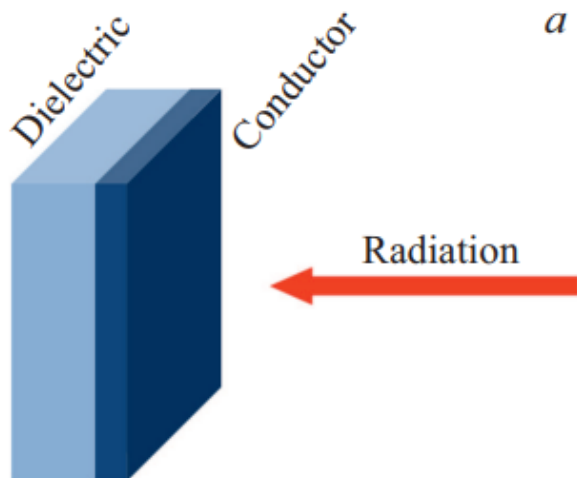
$$\epsilon_\omega \approx i \frac{\omega_p^2}{\nu \omega}$$

$$-\frac{c^2}{\epsilon_0} \frac{d^2 E(z)}{dz^2} - \frac{\omega_p^2}{\epsilon_0} E(z) = \omega^2 E(z)$$

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + i \frac{\omega \omega_p^2}{\nu c^2} E(z) = 0$$

$N = 1$

$N = 5$



$$\nu \ll \omega \ll \omega_p$$

$$N = 1$$

$$F_{1(2)}(\omega) = \max\{|E_{1(2)}|^2 / |E_0|^2\}$$

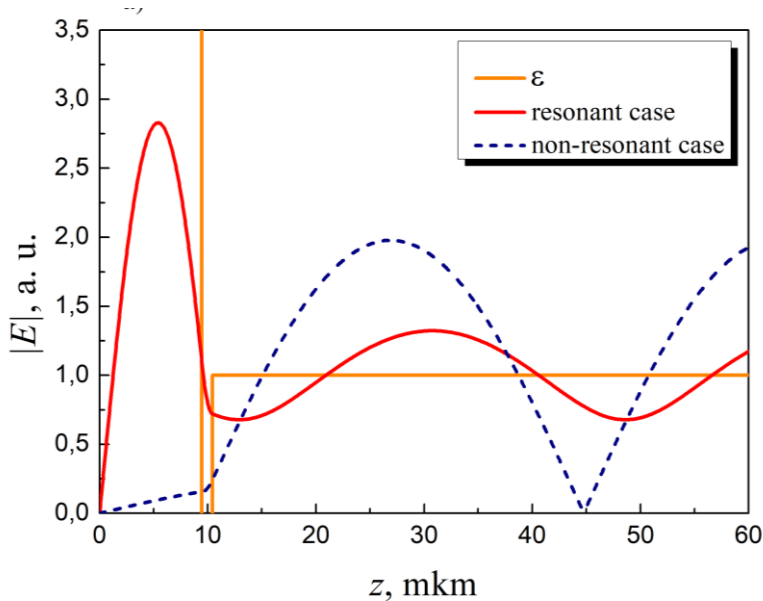
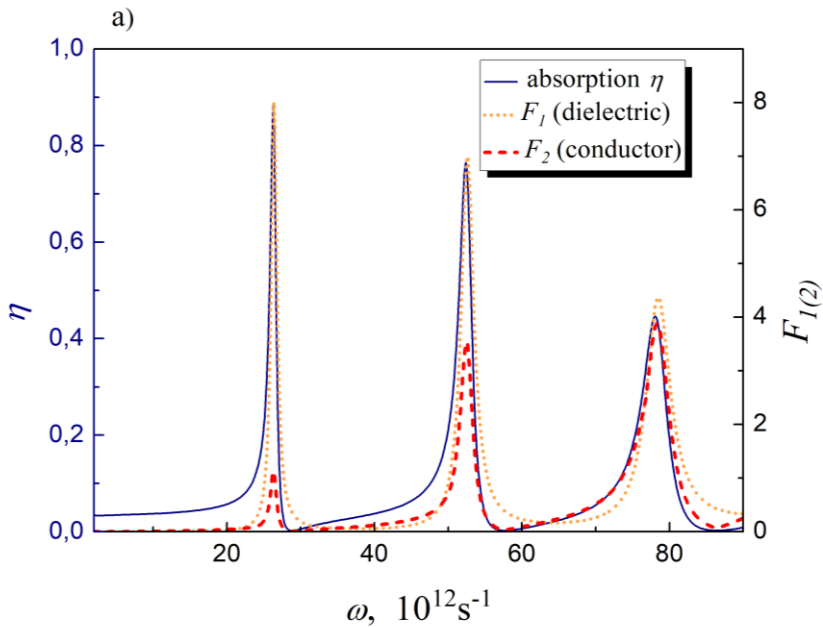
$E_{1(2)}$ - electric field strength of the wave transmitted into the region of undoped (doped) GaAs

E_0 - electric field strength of the incoming flux

→ F_1 (orange line) – total filling factor for dielectric layers

→ F_2 (red line) – total filling factor for conducting layers

→ η (blue line) – absorption



$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$

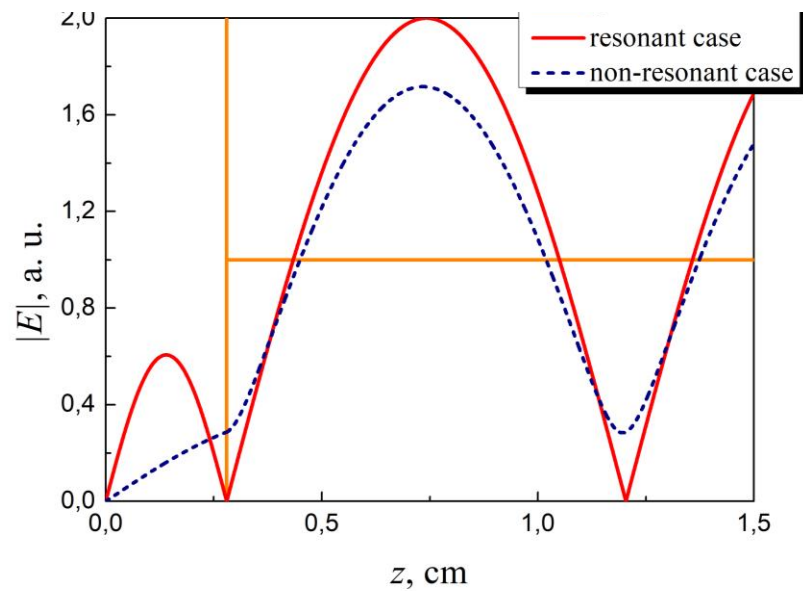
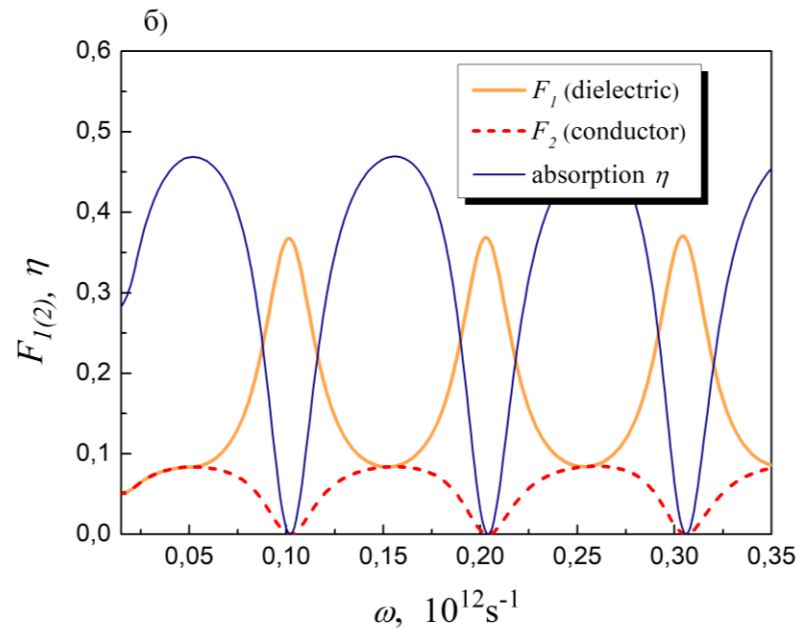
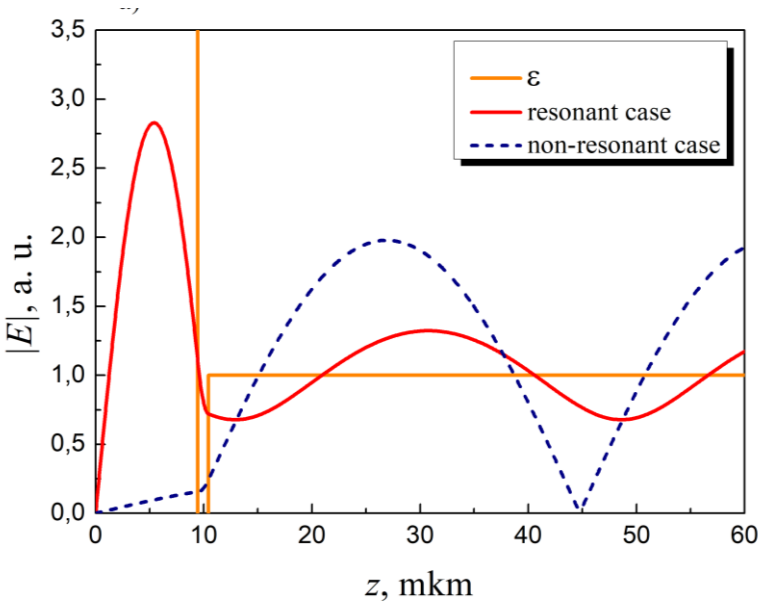
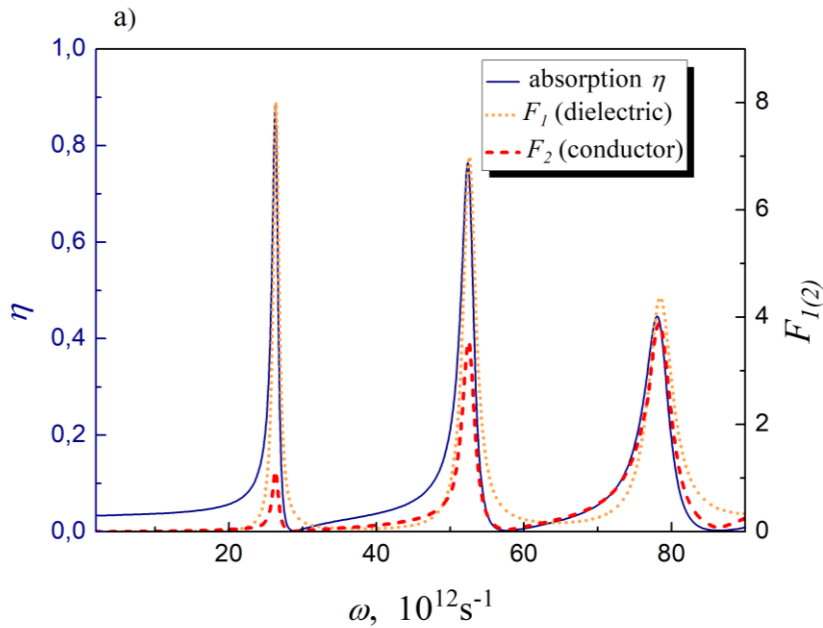
$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_\omega(z) E(z) = 0$$

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\epsilon_0}} n$$

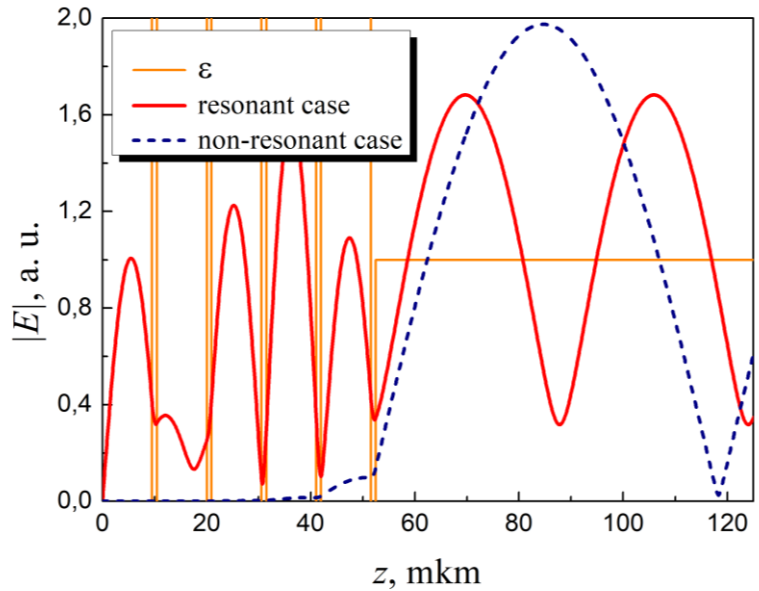
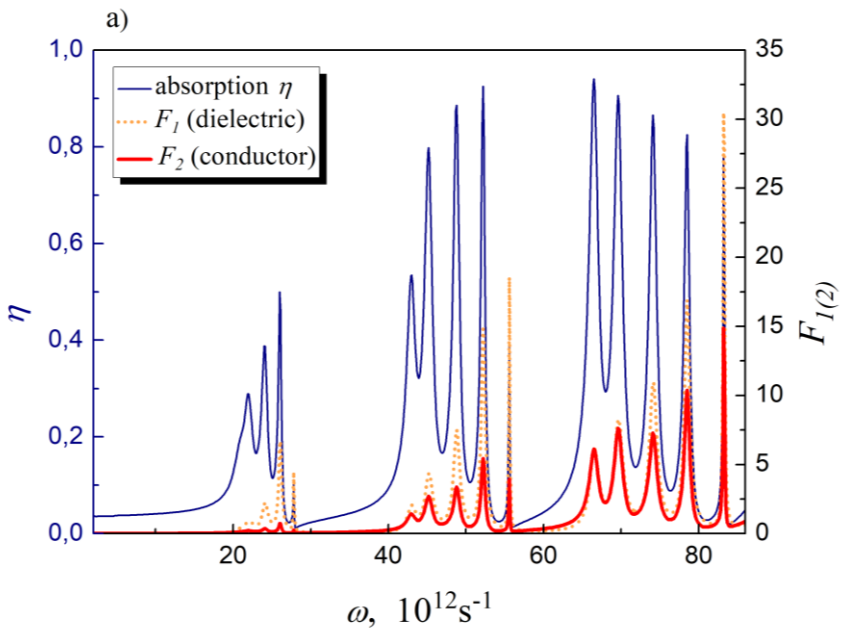
$$\nu \ll \omega \ll \omega_p$$

$$N = 1$$

$$\omega \ll \nu \ll \omega_p$$



$$\nu \ll \omega \ll \omega_p$$



$$N = 5$$

$$F_{1(2)}(\omega) = \max\{|E_{1(2)}|^2 / |E_0|^2\}$$

$E_{1(2)}$ - electric field strength of the wave transmitted into the region of undoped (doped) GaAs

E_0 - electric field strength of the incoming flux

→ F_1 (orange line) – total filling factor for dielectric layers

→ F_2 (red line) – total filling factor for conducting layers

→ η (blue line) – absorption

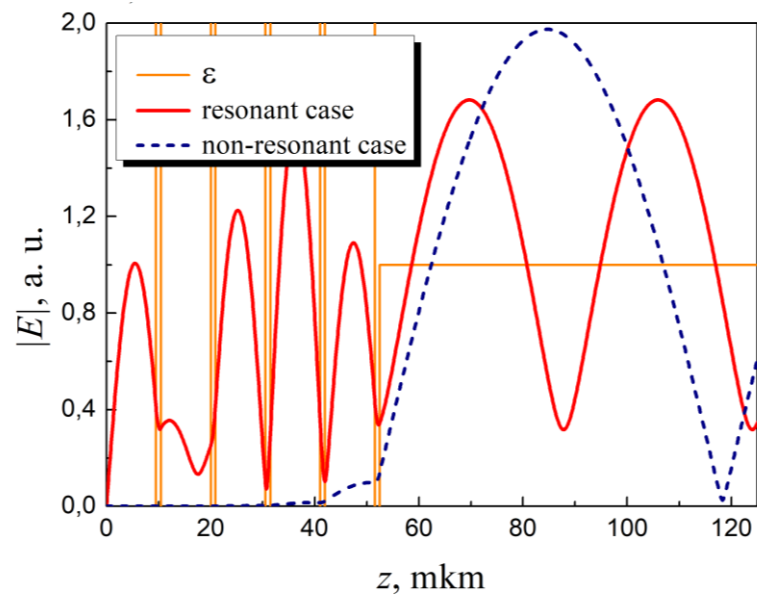
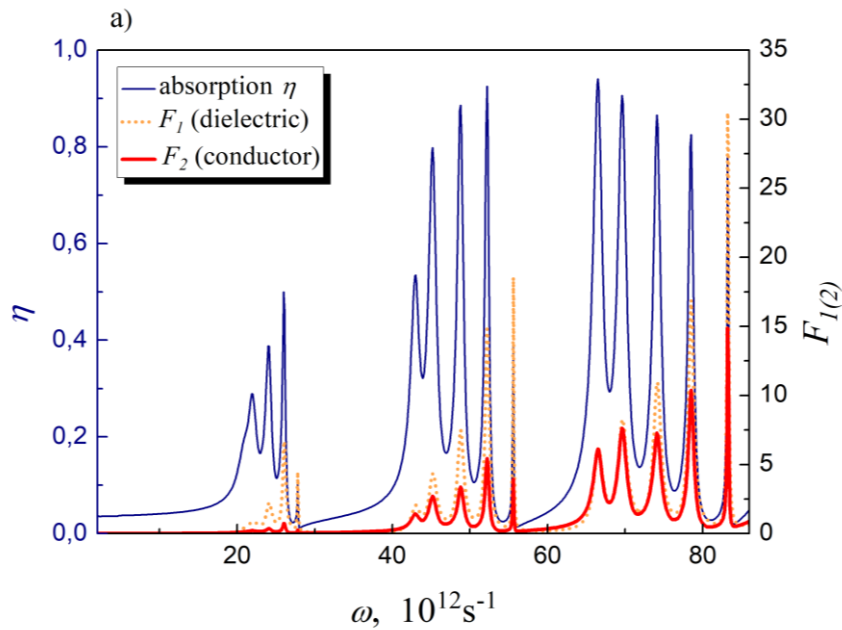
$$\eta(\omega) = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\int E^2(z) dz}{c E_0^2}$$

$$\frac{d^2 E(z)}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_\omega(z) E(z) = 0$$

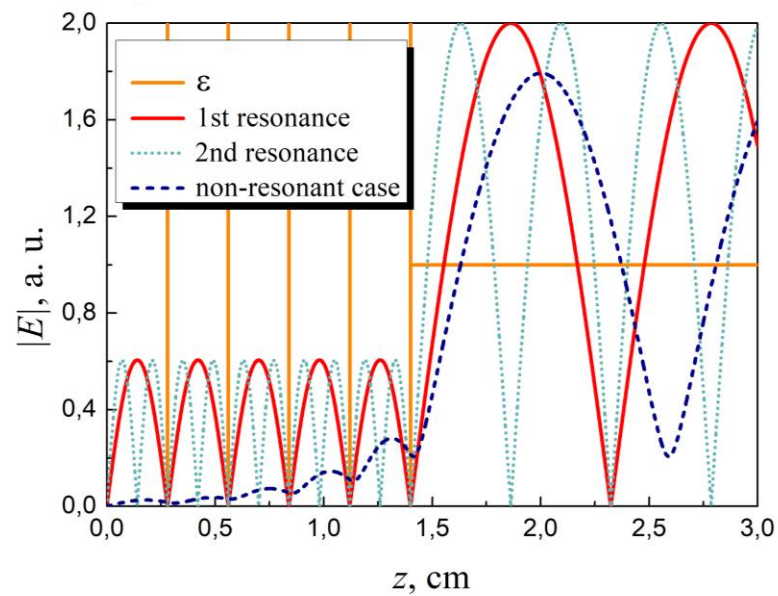
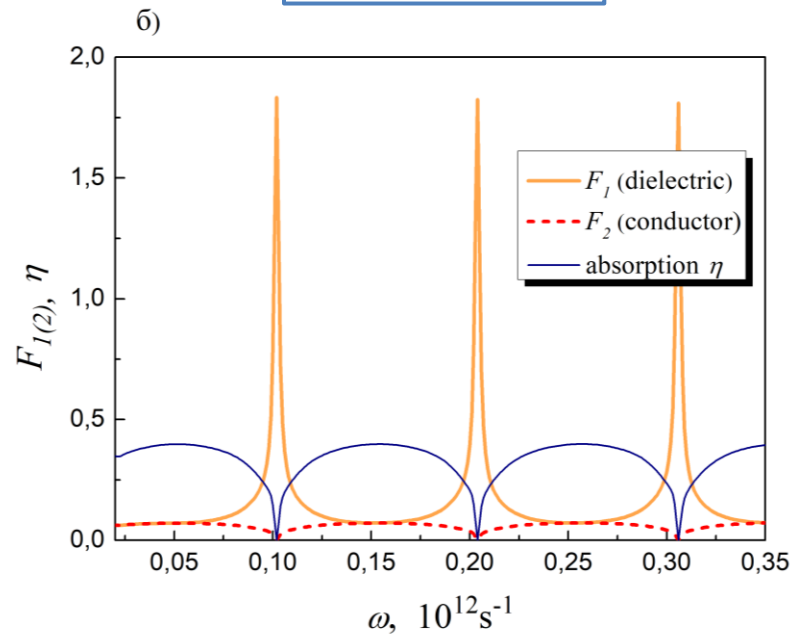
$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a \sqrt{\varepsilon_0}} n$$

$N = 5$

$\nu \ll \omega \ll \omega_p$



$\omega \ll \nu \ll \omega_p$



Выводы

- Характер распространения и поглощения электромагнитных волн в гетероструктурах на основе последовательности проводящих и диэлектрических слоев сильно различается для двух режимов, определяемых соотношением ν и ω

$\nu \ll \omega \ll \omega_p$: увеличение эффективности болометрического детектирования

$\omega \ll \nu \ll \omega_p$: использование таких гетероструктур в качестве фильтра излучения

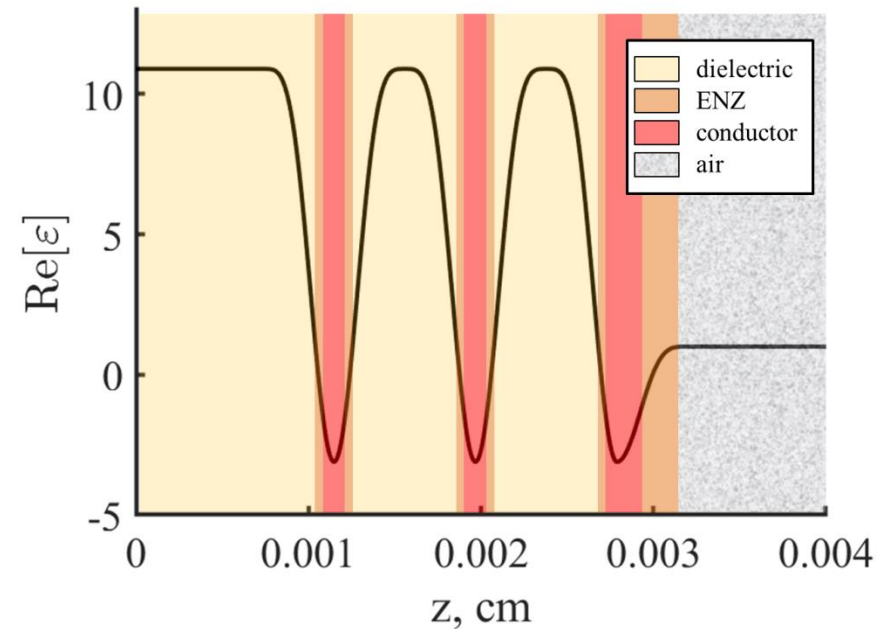
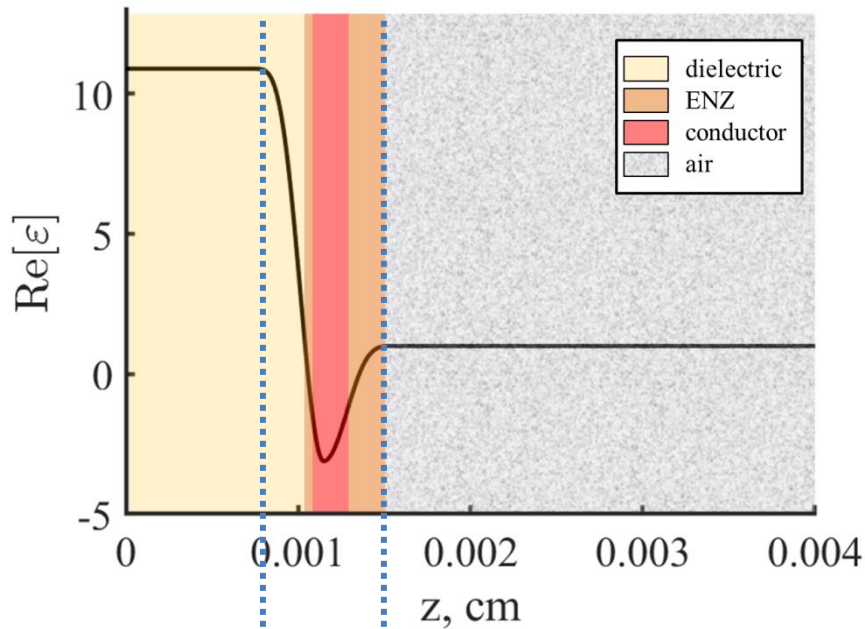
План

- Введение. ТГц диапазон
- Боллометрическое детектирование ТГц излучения
- Детектирование квазимонохроматического излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Резонансная структура «диэлектрик-металл»
- Детектирование широкополосного излучения. Замена металлических слоев слоями легированного полупроводника
- Особенности прохождения сигналов через резонансные структуры для разных частотных диапазонов
- Падение излучения под углом

The scheme of the studied resonant structure consisting of

one dielectric layer

three dielectric layers

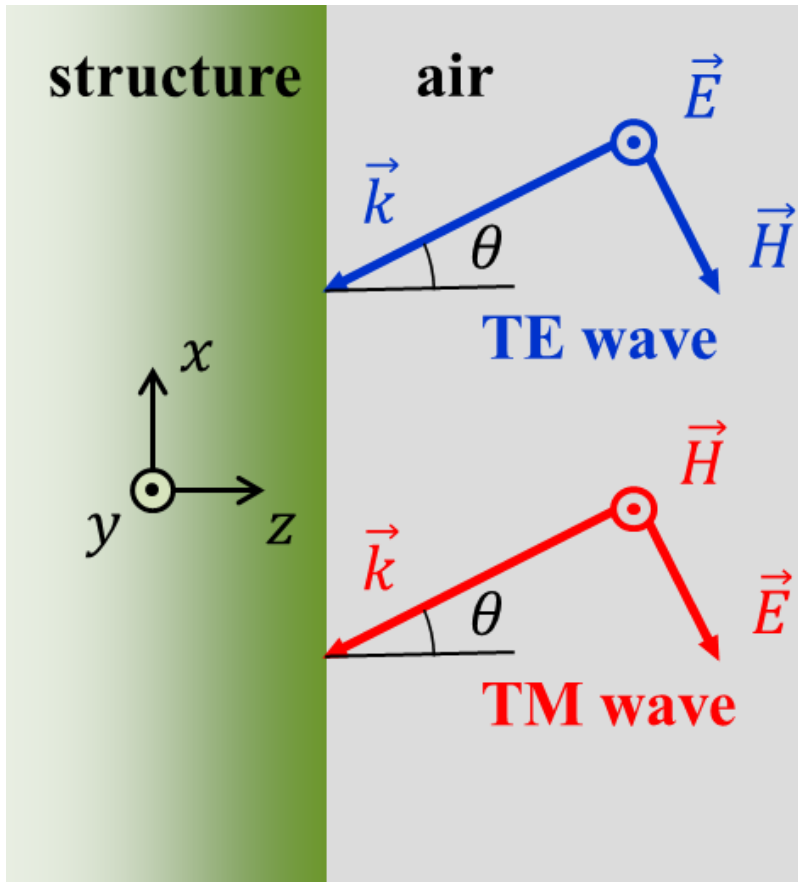


undoped GaAs, ϵ_d
doped GaAs, ϵ

$$\epsilon(z) = \epsilon_d - \frac{\omega_p(z)^2}{\omega^2 + \nu^2} + i \frac{\omega_p(z)^2 \nu}{\omega^2 + \nu^2 \omega}$$

ENZ areas: $-1 < \text{Re}[\epsilon] < 1$

The cases of TE and TM waves for inclined radiation incidence



$$\vec{E}, \vec{H} \sim e^{i\kappa x} \cdot e^{ikz}, \kappa = \text{const} = \frac{\omega}{c} \sin \theta$$

Helmholtz equation for:

a) TE waves

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \left(\varepsilon(z) \frac{\omega^2}{c^2} - \kappa^2 \right) E = 0$$

b) TM waves

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\kappa^2}{\varepsilon(z)} \right) H = 0$$

$$\begin{cases} E_x = -\frac{ic}{\omega\varepsilon} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \\ E_z = \frac{ic}{\omega\varepsilon} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = -\frac{c}{\omega\varepsilon} \kappa H \end{cases}$$

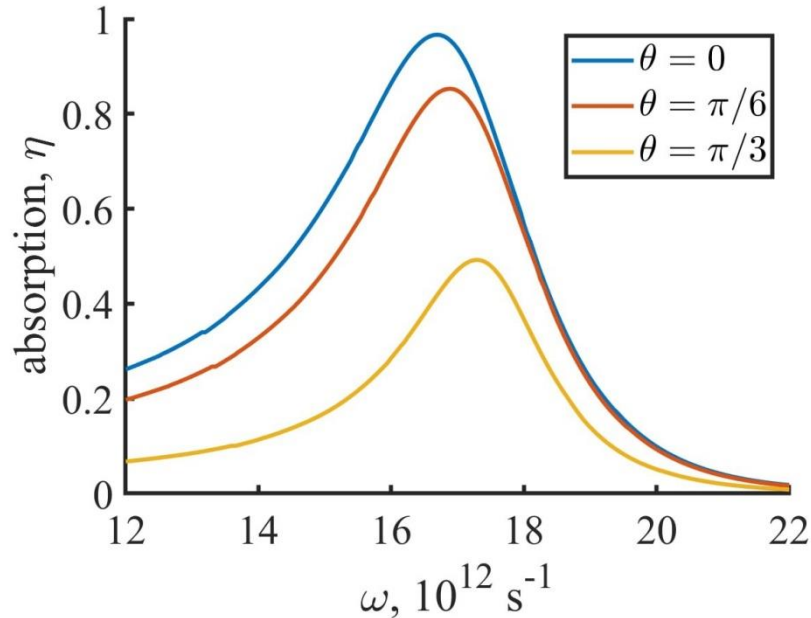
Landau, L. D.; Lifshitz, E. M.

Electrodynamics of continuous media

TE case. Fraction of the absorbed power versus

frequency of the incident radiation

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a\sqrt{\epsilon_d}} n \quad a - \text{thickness of dielectric layer (resonator)}$$



$$\eta_{TE} = \frac{\omega}{c} \int \frac{E^2(z)}{E_0^2} \cdot \text{Im}[\epsilon(z)] dz$$

E_0 - electric field strength of the incident radiation flux
 $E(z)$ - from numerical solution of the Helmholtz equation

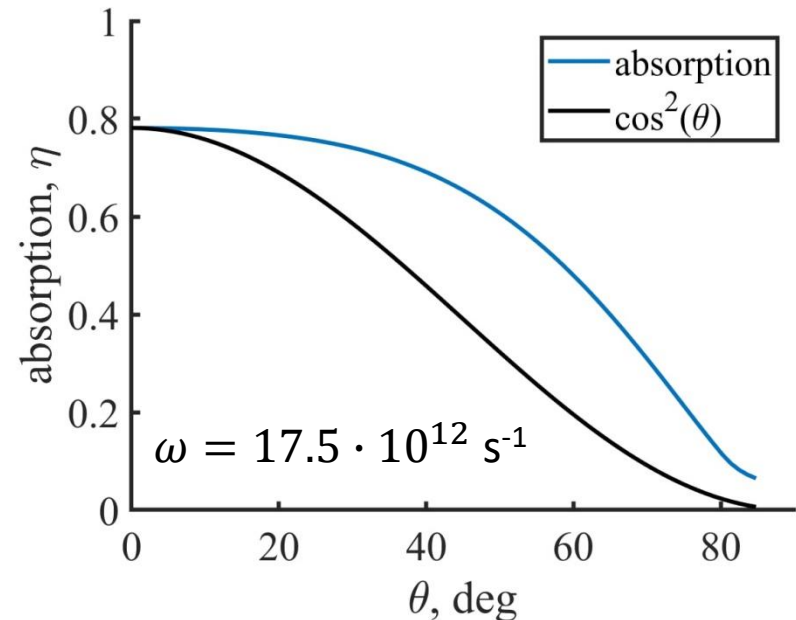
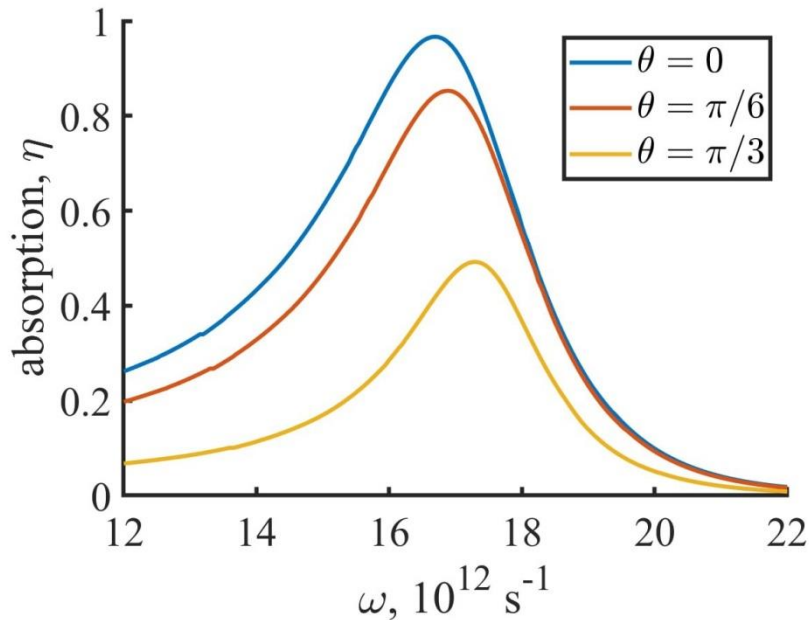
TE case. Fraction of the absorbed power versus

frequency of the incident radiation

angle of incidence

$$\omega_n \approx \frac{\pi c}{a\sqrt{\epsilon_d}} n$$

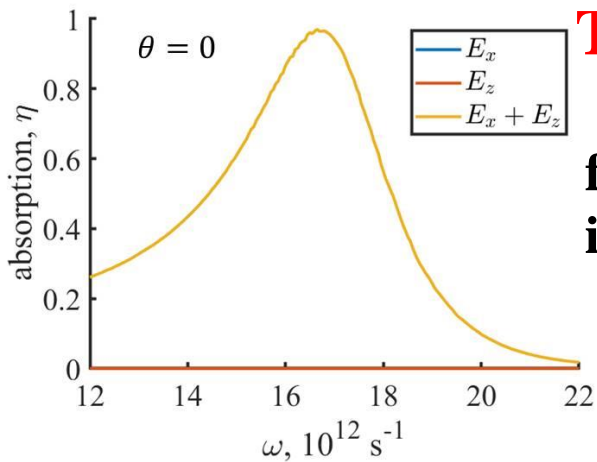
a – thickness of dielectric layer (resonator)



$$\eta_{TE} = \frac{\omega}{c} \int \frac{E^2(z)}{E_0^2} \cdot \text{Im}[\epsilon(z)] dz$$

E_0 - electric field strength of the incident radiation flux
 $E(z)$ - from numerical solution of the Helmholtz equation

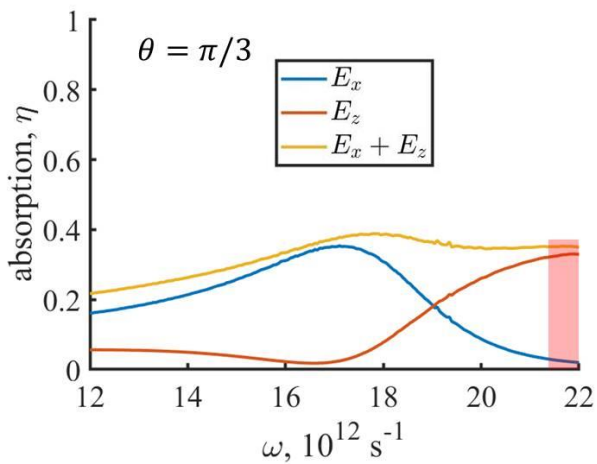
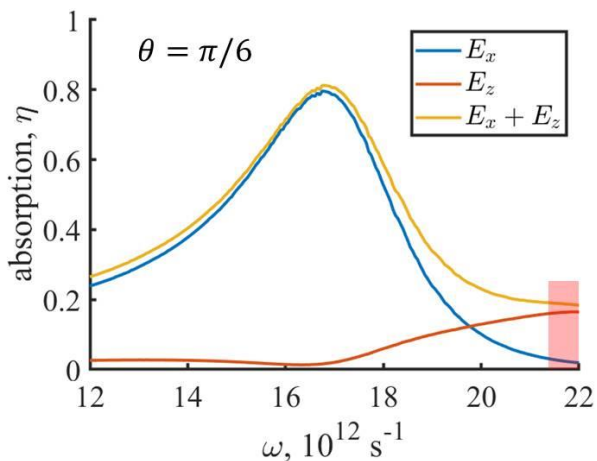
TM case. Fraction of the absorbed power versus

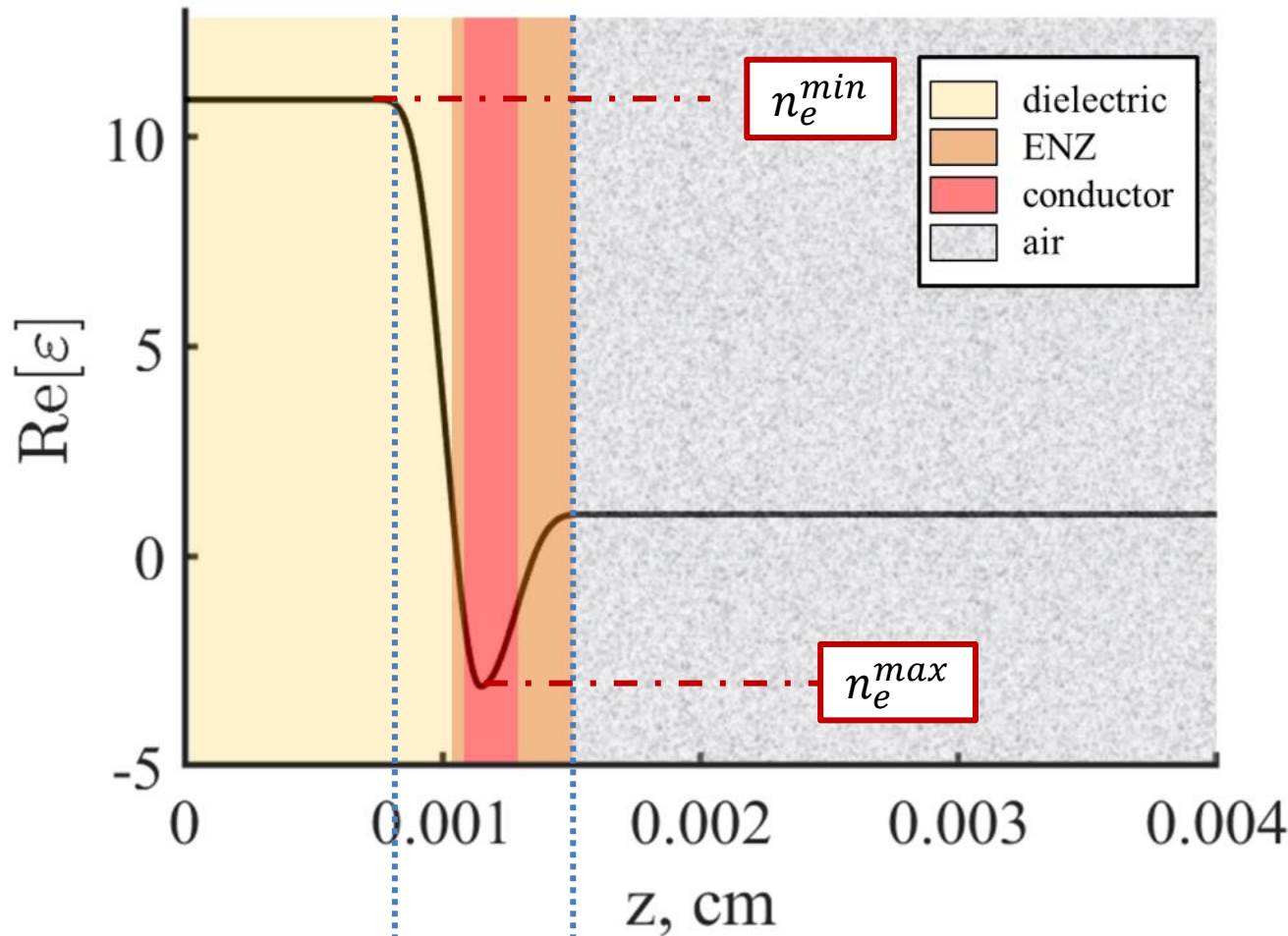


frequency of the incident radiation

ENZ:

$$\epsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$





undoped GaAs, ϵ_d

doped GaAs, ϵ

dielectric
ENZ
conductor
air

n_e^{min}

n_e^{max}

$$n_e^{min} = 0$$

$$n_e^{max} = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\omega_p(z) = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e(z)}{m^*}}$$

$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

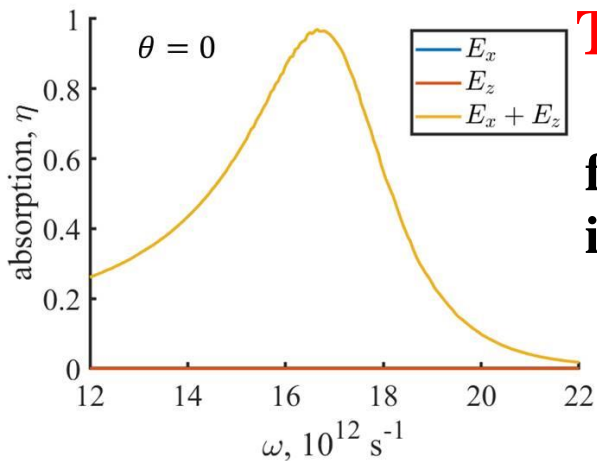
$$\nu = 3.1 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

ENZ areas:

$-1 < \text{Re}[\epsilon(\omega_p^{max})] < 1$

$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$

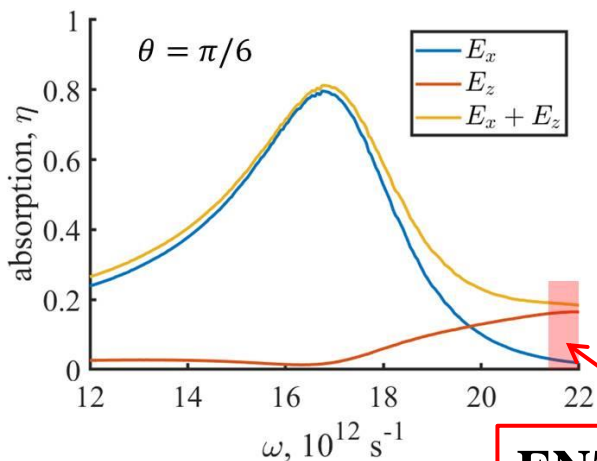
TM case. Fraction of the absorbed power versus



frequency of the incident radiation

ENZ:

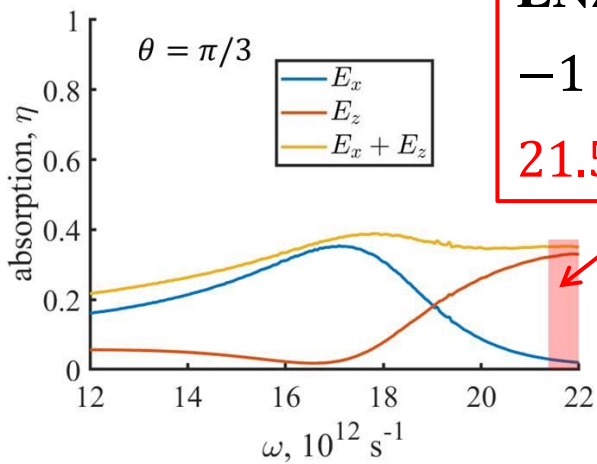
$$\varepsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

$$-1 < \text{Re}[\varepsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

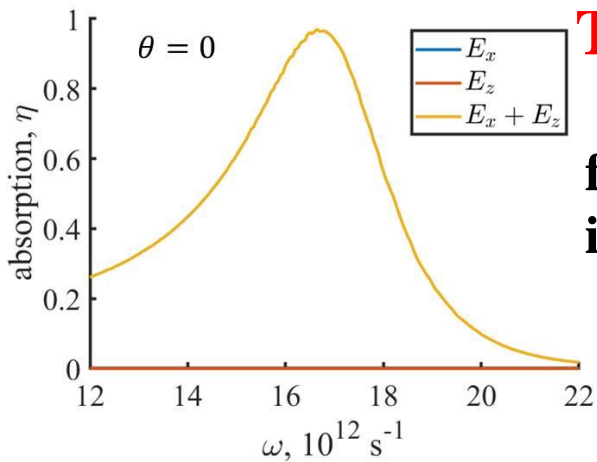


$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

TM case. Fraction of the absorbed power versus

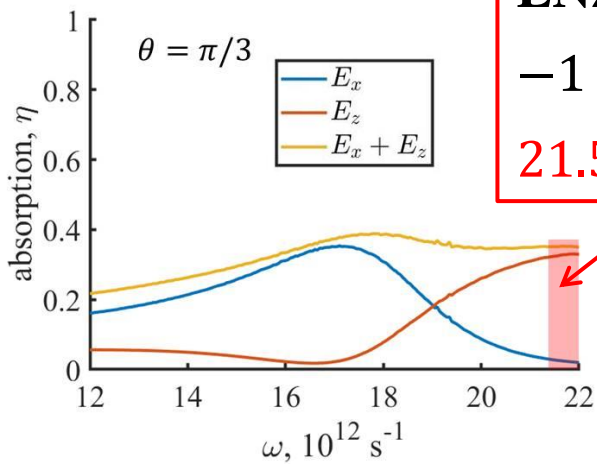
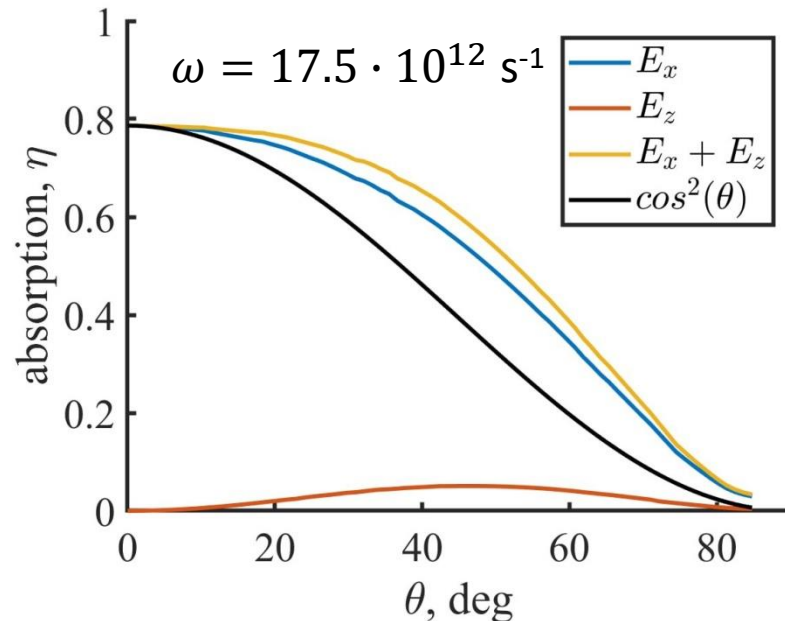
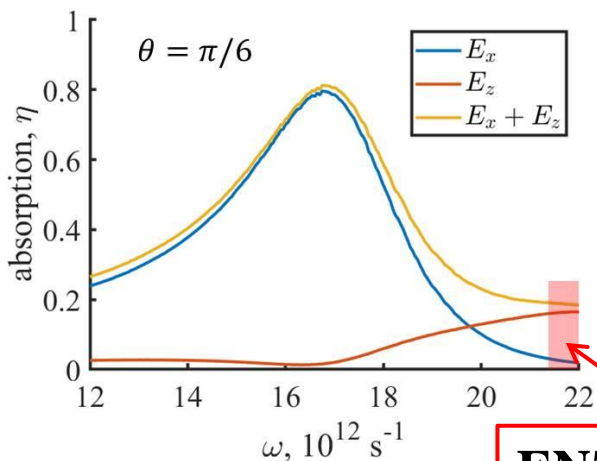


frequency of the incident radiation

angle of incidence

ENZ:

$$\epsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

$$-1 < \text{Re}[\epsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

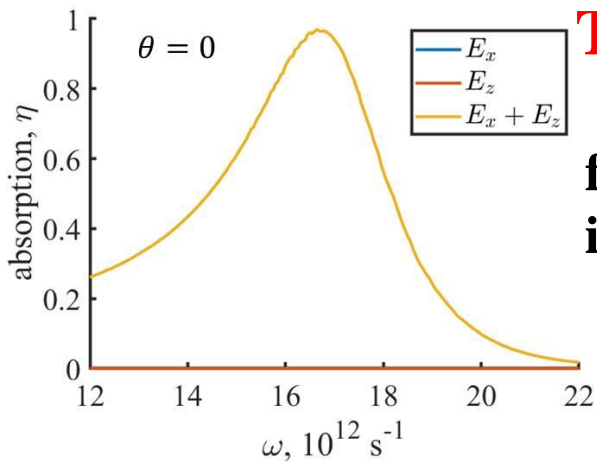
$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

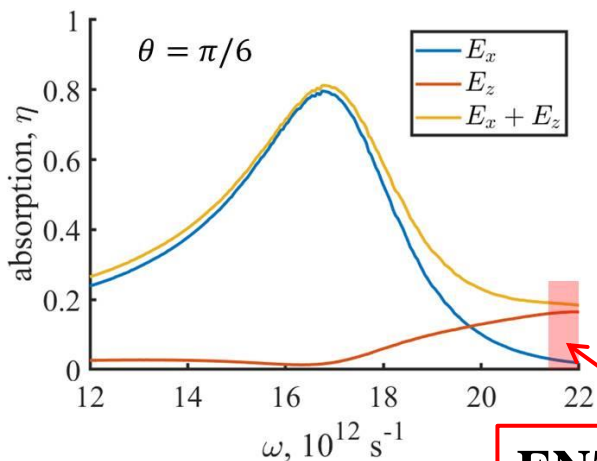
TM case. Fraction of the absorbed power versus



frequency of the incident radiation

ENZ:

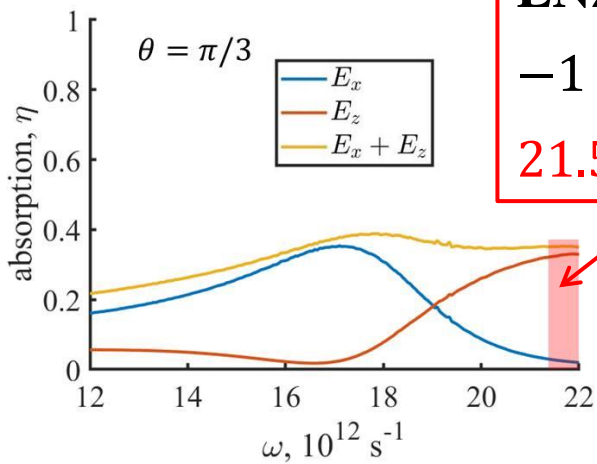
$$\epsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

$$-1 < \text{Re}[\epsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

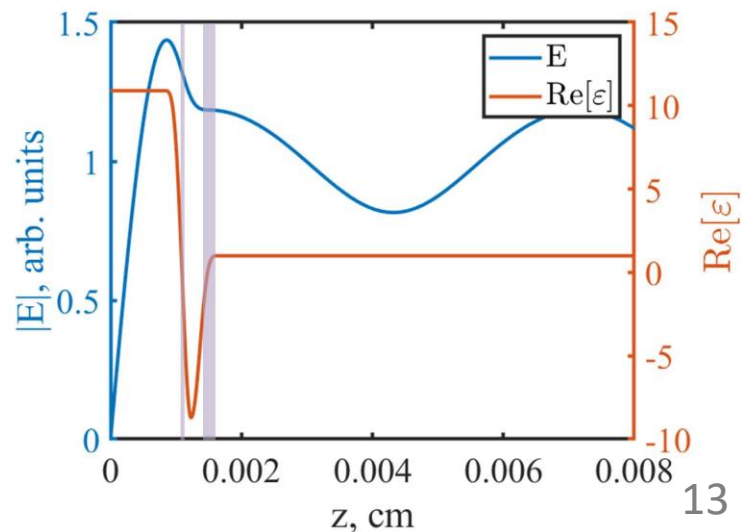
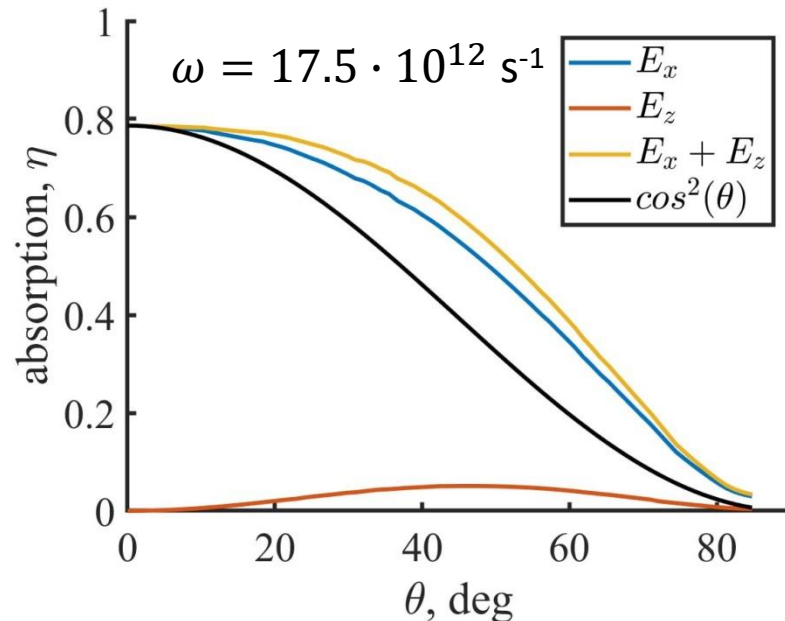


$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

$$\omega_p^{min} = 0$$

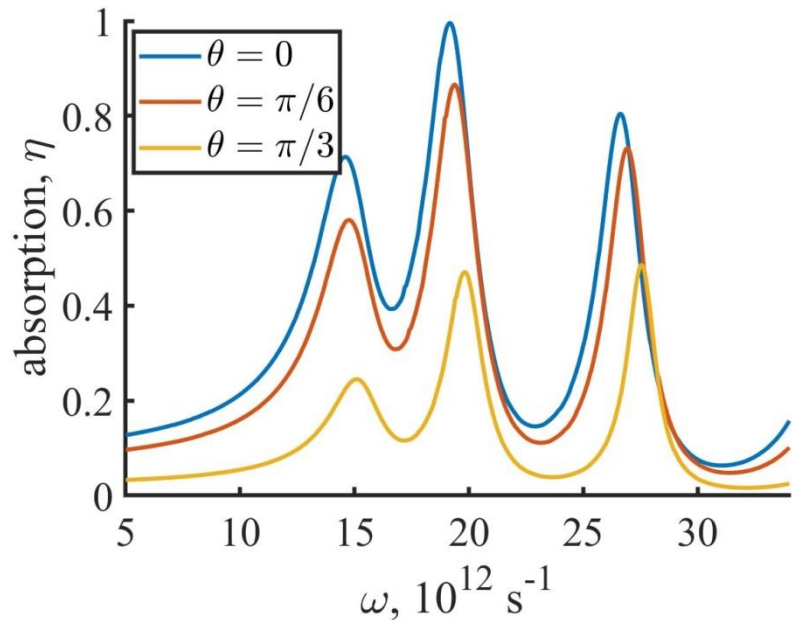
$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

angle of incidence



TE case. Fraction of the absorbed power versus

frequency of the incident radiation



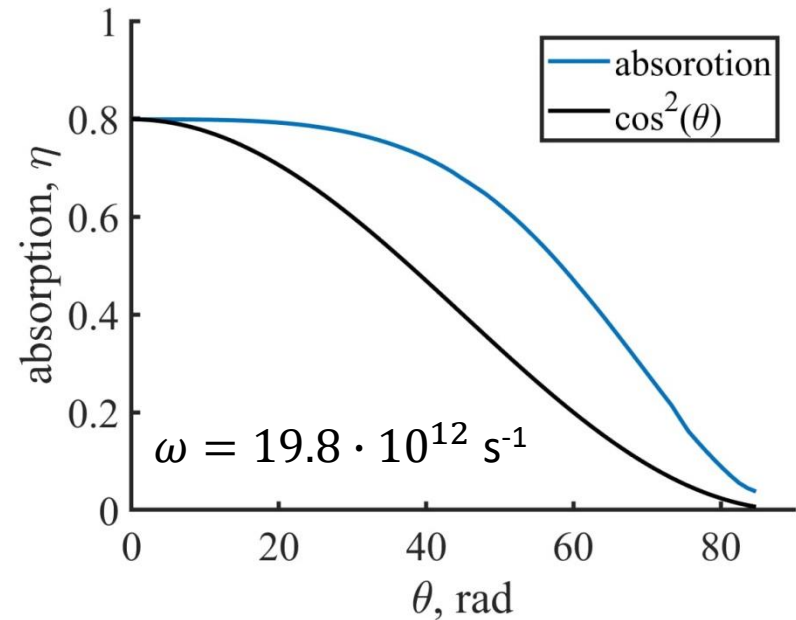
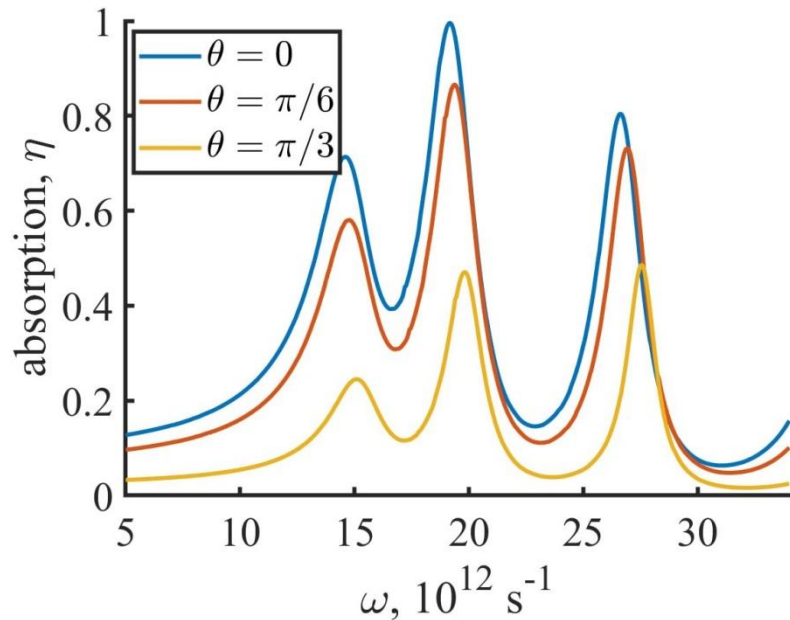
$$\eta_{TE} = \frac{\omega}{c} \int \frac{E^2(z)}{E_0^2} \cdot \text{Im}[\varepsilon(z)] dz$$

E_0 - electric field strength of the incident radiation flux
 $E(z)$ - from numerical solution of the Helmholtz equation

TE case. Fraction of the absorbed power versus

frequency of the incident radiation

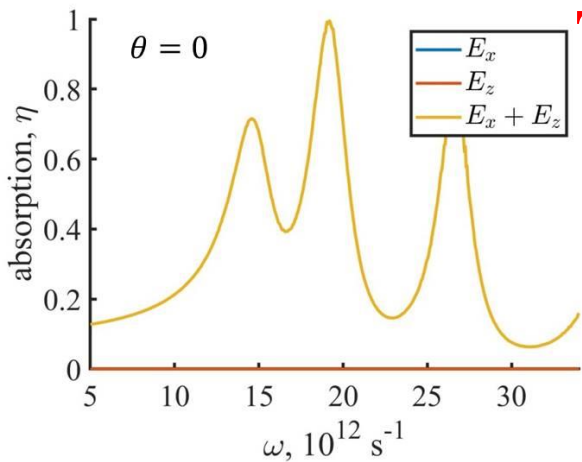
angle of incidence



$$\eta_{TE} = \frac{\omega}{c} \int \frac{E^2(z)}{E_0^2} \cdot \text{Im}[\varepsilon(z)] dz$$

E_0 - electric field strength of the incident radiation flux
 $E(z)$ - from numerical solution of the Helmholtz equation

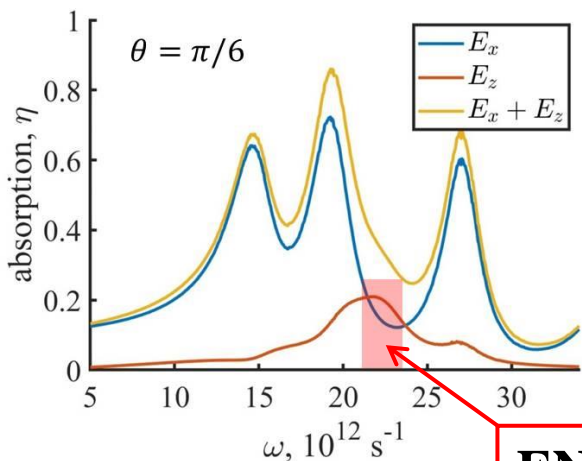
TM case. Fraction of the absorbed power versus



frequency of the incident radiation

ENZ:

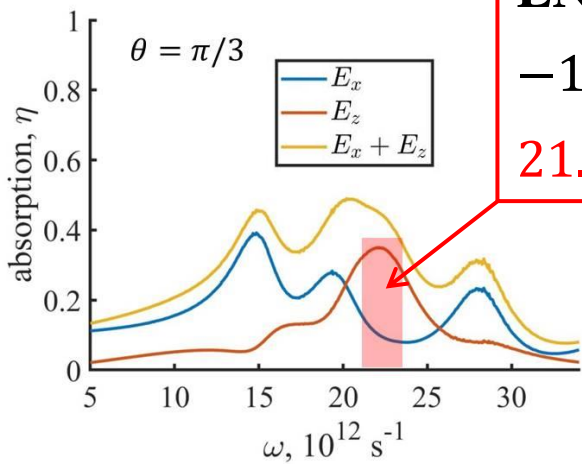
$$\varepsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

$$-1 < \text{Re}[\varepsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

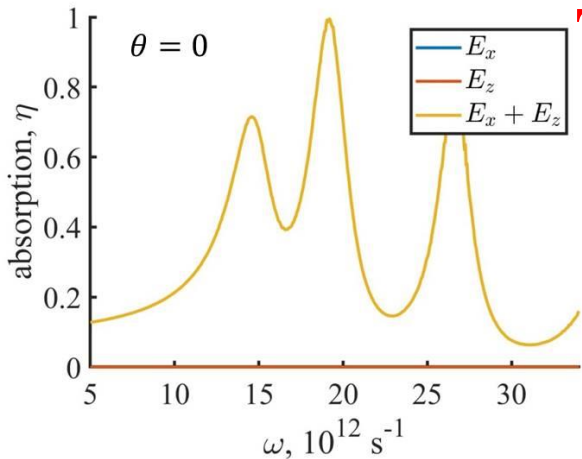


$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

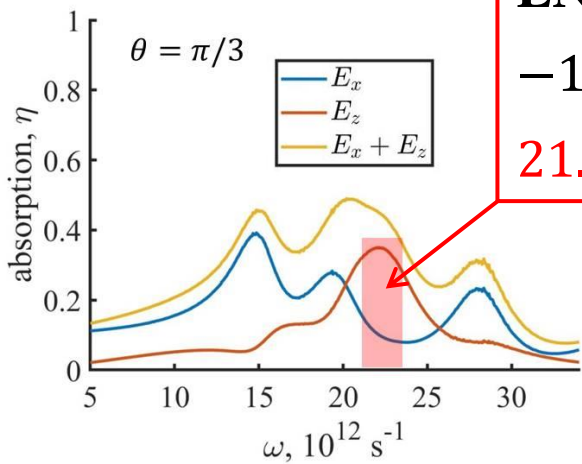
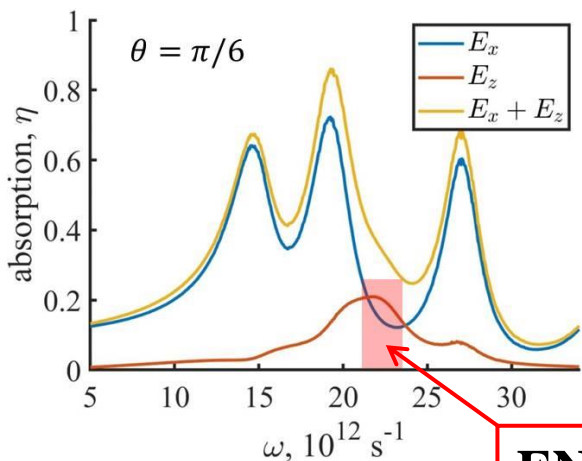
TM case. Fraction of the absorbed power versus



frequency of the incident radiation

ENZ:

$$\epsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

$$-1 < \text{Re}[\epsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

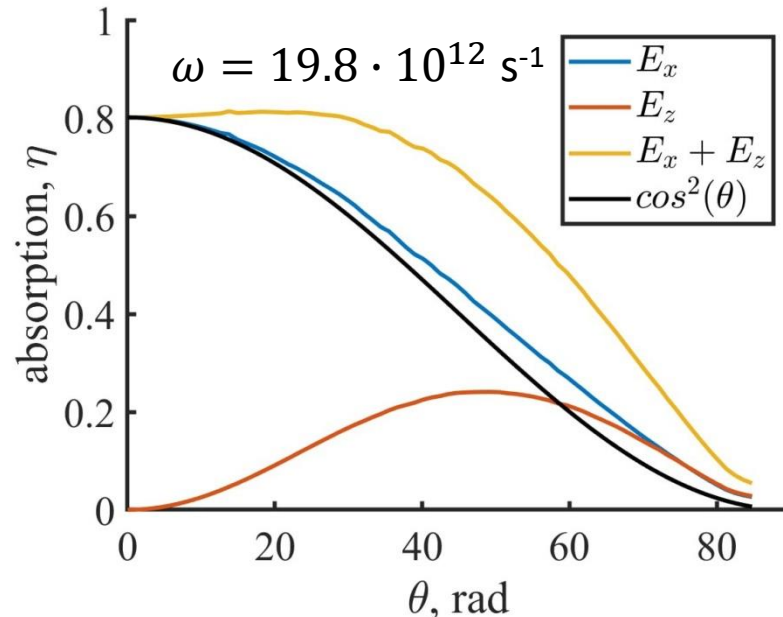
$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

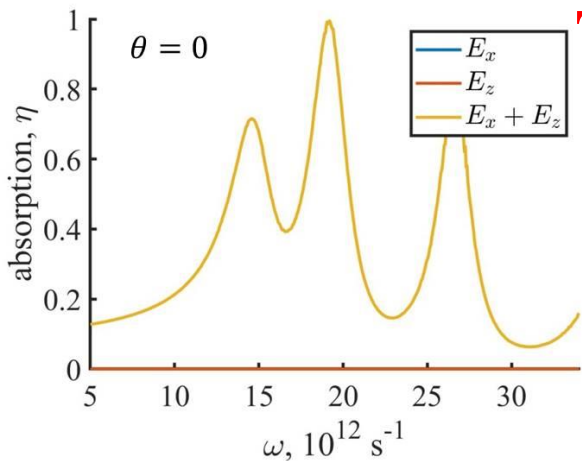
$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

angle of incidence



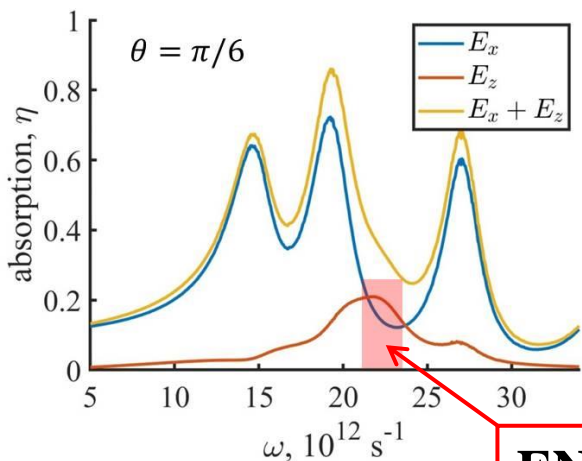
TM case. Fraction of the absorbed power versus



frequency of the incident radiation

ENZ:

$$\epsilon_d \approx \omega_p^2 / \omega^2$$



ENZ areas:

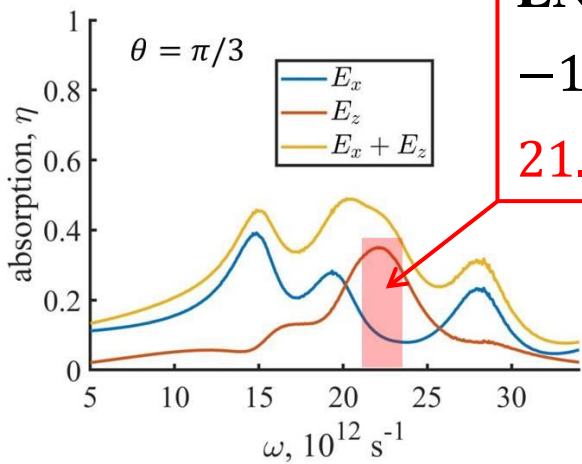
$$-1 < \text{Re}[\epsilon(\omega_p^{max})] < 1$$

$$21.5 < \omega < 23.5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$$

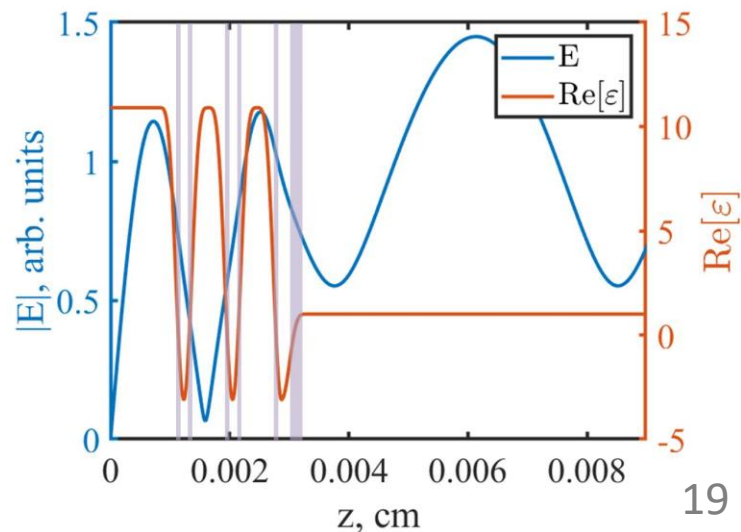
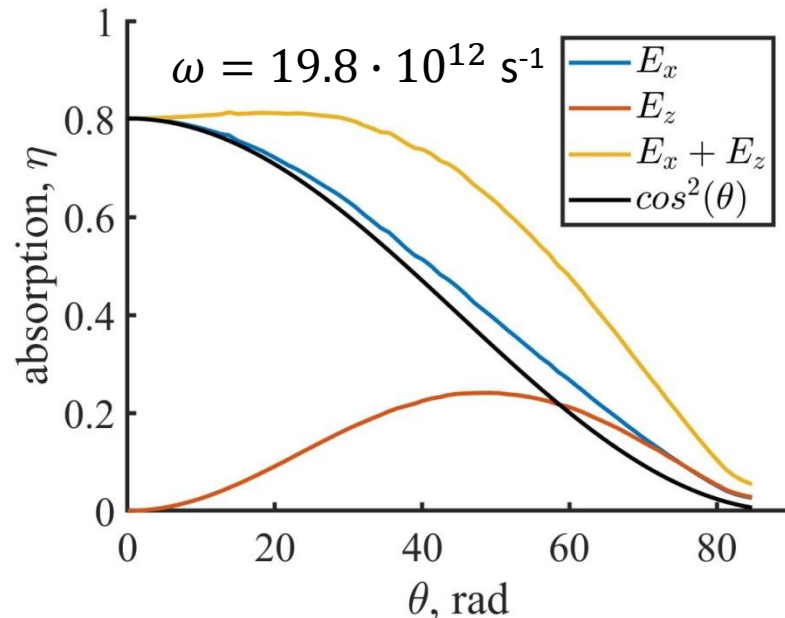
$$\omega_p(z) \sim \sqrt{n_e(z)}$$

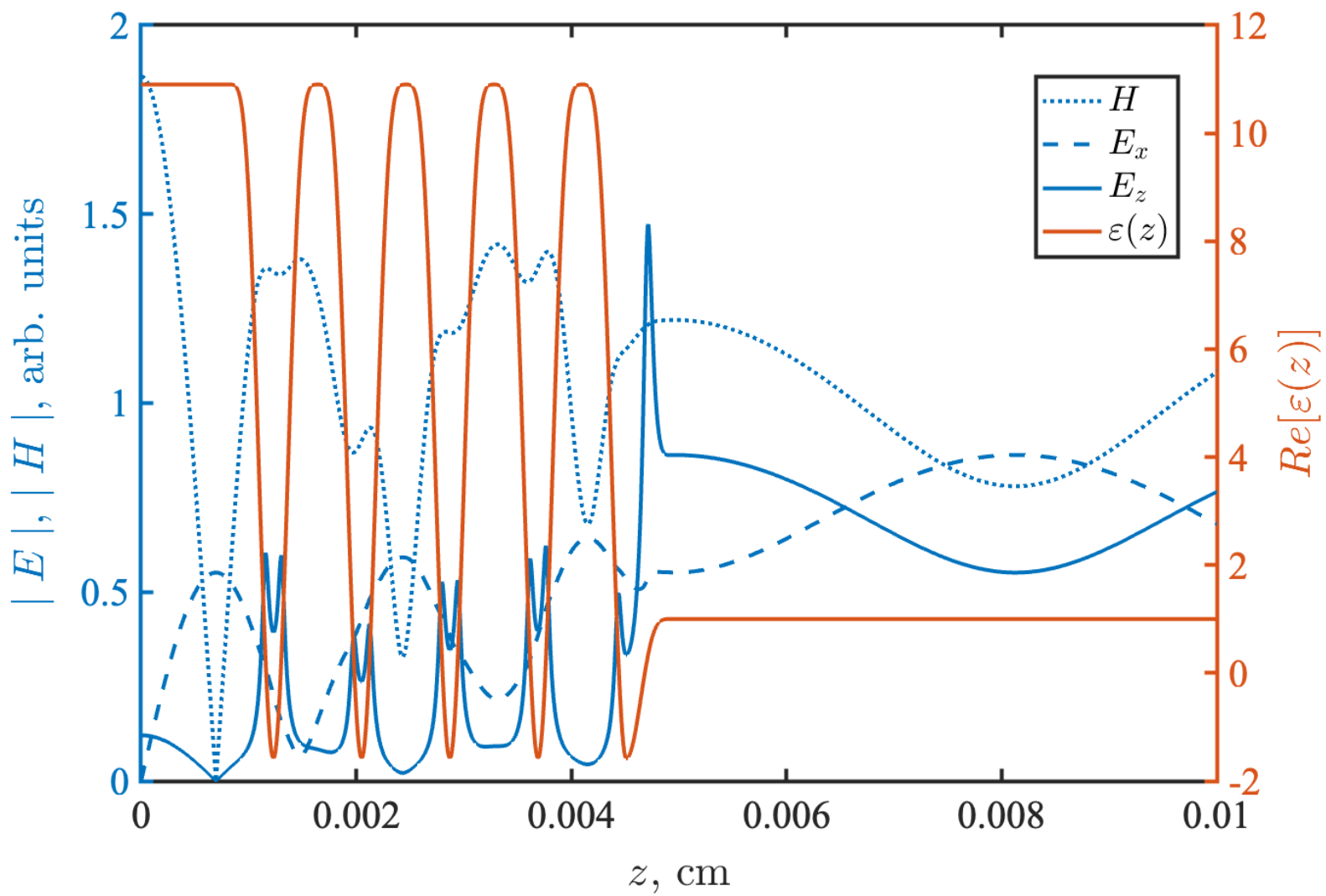
$$\omega_p^{min} = 0$$

$$\omega_p^{max} = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$



angle of incidence





Выводы

- Предложенная резонансная структура на основе легированного и нелегированного GaAs, а так же ENZ слоев обеспечивает поглощение на уровне 80% для широкого диапазона углов падения от 0 до 40 градусов для TE и TM волн. Для сигналов, падающих под углом 60 градусов, указанная структура может обеспечить поглощение до 50% энергии падающего излучения

Спасибо за внимание!