



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PERIODICKÉ STRUKTURY A JEJICH VYUŽITÍ PRO FORMOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE V ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPII

PERIODIC STRUCTURES AND THEIR USE FOR ELECTROMAGNETIC FIELD SHAPING IN ELECTRON
MICROSCOPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Larva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Vojtěch Larva

ID: 246886

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Periodické struktury a jejich využití pro formování elektromagnetického pole v elektronové mikroskopii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základní vlastnosti šíření širokopásmového signálu v oblasti elektromagnetických vln ve frekvenční a časové oblasti pro blízkou oblast periodických struktur. Popište principy měření, vyhodnocení a modelování jednoduchého uspořádání generátoru elektromagnetické (EMG) vlny a periodické struktury. Navrhněte numerický model a způsob analýzy EMG pole v oblasti struktury.

Návrh modelu realizujte a pro vybranou geometrickou část elektronového mikroskopu analyzujte. Model řešte metodou konečných prvků ve vysokofrekvenčním modulu ANSYS HFSS. Model směřujte k parametrům: $U_{ak} = 1000$ V, rozměr aktivní části 2-5 mm, použijte pro modelování vlnový model svazku s pohybem elektrického náboje - elektronu. Analýzu proveďte a zhodnoťte dosažené parametry vlivu periodické struktury na chování elektronového svazku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DĚDEK, L, DĚDKOVÁ, J. Elektromagnetismus. 2. vyd. Brno: VITIUM, 2000. 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
- [2] ANSYS, 1990-2011, manuál, Houston, USA.
- [3] CALOZ C.; ITOH T., Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, Willey - Interscience, 2005.
- [4] MARQUÉS R.; MARTÍN F.; SOROLLA M., Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications, John Wiley & Sons Inc., 2008
- [5] SOLYMAR L.; SHAMONINA E., Waves in Metamaterials, Oxford University Press, 2009
- [6] PENDRY J. B., "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", Physical Review Letters, Vol 85, pp. 3966-3969, (2000)

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 2.6.2025

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem numerického modelu periodické struktury a způsobu analýzy elektromagnetického pole v jejím okolí, za účelem vyhodnocení jejího vlivu na elektronový svazek v elektronovém mikroskopu. Jsou popsány základní pojmy elektronové mikroskopie, šíření elektromagnetického pole a vlastnosti periodických struktur. Je popsán návrh modelu periodické struktury a postup její analýzy v programovém prostředí ANSYS HFSS.

KLÍČOVÁ SLOVA

Periodické struktury, elektronová mikroskopie, numerické modelování, metamateriály, ANSYS HFSS

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of a numerical model of a periodic structure and a method of analysis of the electromagnetic field in its surroundings, in order to evaluate its influence on the electron beam in an electron microscope. Basic concepts of electron microscopy, electromagnetic field propagation and properties of periodic structures are described. The design of a periodic structure model and the procedure of its analysis in the ANSYS HFSS software environment are described.

KEYWORDS

Periodic structures, electron microscopy, numerical modelling, metamaterials, ANSYS HFSS

LARVA, Vojtěch. *Periodické struktury a jejich využití pro formování elektromagnetického pole v elektronové mikroskopii*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2025. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Vojtěch Larva
VUT ID autora:	246886
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2024/25
Téma závěrečné práce:	Periodické struktury a jejich využití pro formování elektromagnetického pole v elektronové mikroskopii

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Pavlu Fialovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Současný stav	11
2 Základní pojmy a principy elektronové mikroskopie	14
2.1 Elektronová mikroskopie	14
2.2 Typy elektronových mikroskopů	15
3 Šíření elektromagnetického pole a interakce vln	16
3.1 Princip generování EMG vlny:	17
4 Periodické struktury	18
4.1 Charakteristiky periodických struktur:	18
4.1.1 Geometrie	18
4.1.2 Použité materiály	18
4.1.3 Výroba	18
5 Návrh numerického modelu	20
6 Postup analýzy numerického modelu	23
6.1 Geometrie modelu	23
6.2 Nastavení okrajových podmínek	24
6.2.1 Lattice Pairs	24
6.3 Nastavení buzení modelu	25
6.4 Definice parametrů analýzy	26
6.5 Stanice pro výpočet	26
7 Očekávané výstupy	27
7.1 Rozložení EMG pole	27
7.1.1 Hladký substrát	27
7.1.2 Metapovrch	29
8 Diskuze	31
Závěr	32
Literatura	33
Seznam symbolů a zkratk	38

Seznam obrázků

1.1	Skupinová rychlost a fázová rychlost [9]	11
4.1	Příklad periodického uspořádání inverzní struktury na substrátu (rozměry prvku: $d = 10$ nm, $h = 10$ nm, $l = 50$ nm)	19
5.1	Navržená geometrie a uspořádání periodické struktury	20
5.2	Geometrie prvků struktury	21
6.1	Minimalizovaný model struktury	23
6.2	Párové podmínky Lattice Pair	24
6.3	Buzení struktury pomocí Floquet portů	25
6.4	Nastavení analýzy	26
7.1	Rozložení modulu intenzity elektrického pole u hladkého povrchu substrátu. (Převzato z: [37])	27
7.2	Rozložení modulu intenzity magnetického pole u hladkého povrchu substrátu. (Převzato z: [37])	28
7.3	Rozložení modulu intenzity elektrického pole u metapovrchu. (Převzato z: [37])	29
7.4	Rozložení modulu intenzity magnetického pole u metapovrchu. (Převzato z: [37])	30

Úvod

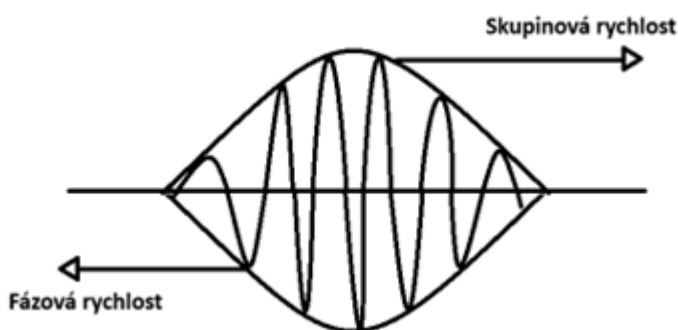
Elektronová mikroskopie (EM) je v současnosti jedním ze základních způsobů, jak zobrazovat povrchy na úrovni mikrometrů a nanometrů [1]. Protože s touto metodou lze dosáhnout mimořádně velkého rozlišení, je využívána v mnoha vědních a průmyslových oborech, od materiálového inženýrství [2] po biologii [3]. Zásadním faktorem pro korektní funkci elektronového mikroskopu je přesné řízení a formování elektromagnetického pole v oblasti elektronového svazku a jeho okolí, které usměrňuje a zaostřuje primární svazek elektronů [4]. Návrhy koncepcí a konstrukcí EM jsou rozdílné a liší se svým účelem. Základní problém šíření elektromagnetického svazku spočívá v dosažení nastavení homogenního elektromagnetického pole v jeho okolí, to proto, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění trajektorie šíření elektrického náboje (elektronového svazku) v tělese mikroskopu.

Naopak, efektu interakcí elektromagnetických polí – svazek a okolní pole, se využívá pro návrh částí elektronové optiky. V tomto smyslu mají v současnosti nosný význam periodické struktury [5]. Ty umožňují změnu výsledného časově a prostоровě uspořádaného elektromagnetického pole (EMG) a tím také umožňují modulaci a kontrolu šíření elektromagnetických vln v rozdílných prostředích konstrukce elektronové optiky. Koexistence elektromagnetického pole se musí řešit a využívá v částech elektronového mikroskopu, což má přímý vliv na vlastnosti primárního nebo i sekundárního elektronového svazku.

Cílem této práce je studium šíření úzkopásmového signálu v oblasti elektromagnetických vln (odpovídající zvolené energii elektronového svazku), a to zejména v blízkém prostoru a oblastech vhodně navržených a provedených periodických struktur. Důraz je kladen na analýzu frekvenčních a časových charakteristik elektromagnetických vln v okolí periodických struktur a na numerické modelování, analýzu a vyhodnocení vznikajících interferenčních jevů. Hlavním výzkumným nástrojem je proces numerického modelování se zvolenou metodou konečných prvků (FEM) implementovanou ve vysokofrekvenčním modulu systémového nástroje softwaru ANSYS HFSS [6]. Modul HFSS umožňuje analýzy s definovanou přesností modelování a analýzu šíření elektromagnetických vln, a to pro navržené geometrické a matematické modely periodických struktur s možností volby míry periodicity. V rámci této práce bude navržen numerický model jednoduchého uspořádání generátoru elektromagnetické vlny a periodické struktury, a také způsob jeho analýzy pro oblast frekvencí odpovídající elektronovému svazku. Očekává se, z analýz modelů, získání kvantitativní a kvalitativní představy o vlastnostech interakce periodické struktury a elektronového svazku.

1 Současný stav

Šíření širokopásmových signálů v disperzních médiích je předmětem výzkumu [7], zejména s ohledem na jejich aplikace v moderních komunikačních technologiích [7]. Klíčovým aspektem tohoto výzkumu je pochopení pojmu „širokopásmovost“, který je definován jako obálka oscilací na výstupu přijímače získaná pomocí optimálního filtru [8]. Tento přístup umožňuje přesnější analýzu dynamiky signálů v disperzních prostředích, přičemž dochází k odlišení rychlosti šíření širokopásmového signálu od tradičně chápané skupinové rychlosti 1.1.



Obr. 1.1: Skupinová rychlost a fázová rychlost [9]

Zavedením podobnostní veličiny, která charakterizuje míru zkreslení původního signálu po jeho průchodu médiem, lze lépe modelovat vliv různých vlastností prostředí na šíření signálů. Příklady z různých frekvenčních pásem demonstrují zásadní rozdíly mezi šířením signálů při nízkých a vysokých frekvencích až po optické frekvence s dosahem na frekvence odpovídající elektronovému svazku. Tyto poznatky jsou zvláště významné při analýze koherence EMG vlny elektronového svazku a okolního prostředí. To je pro naši práci, navržené z periodických struktur. Interakce elektromagnetických polí s materiálem nebo metamateriálem (periodickou strukturou) ovlivňuje charakter šíření signálů [8, 10, 11].

Numerické modelování periodických struktur se opírá také o možné využití Floquetových portů v metodě konečných prvků (FEM) modulu HFSS. Teorie Floquetových módů umožňuje efektivní výpočet elektromagnetických polí v periodických strukturách, což výrazně zlepšuje přesnost simulací, snižuje náročnost na HW a rozsah dynamické paměti. Tento přístup je široce využitelný při analýze povrchových vln, frekvenčně selektivních povrchů a dalších aplikací, ve kterých interakce mezi periodickými strukturami a elektromagnetickým polem tvoří hlavní efekt interakce EMG pole. Srovnání experimentálních výsledků s výsledky numerických analýz výpočetním systémem ANSYS HFSS potvrzuje spolehlivost a přesnost numerické analýzy

a navržené metody [12].

V otevřených 3D periodických strukturách se projevuje interakce relativistického elektronového svazku s vysokofrekvenčními poli [13]. Tento jev, známý jako dvouvlnový rezonanční režim, nachází využití v oscilátorech a zesilovačích typu O v oblasti milimetrových vln, kde urychlovací napětí nepřesahuje 100 kV [13]. Tyto poznatky rozšiřují možnosti efektivního využití pohybu nosičů nábojů, elektronů, pro generování a modulaci elektromagnetických vln v různých frekvenčních pásmech [13, 14].

Pro analýzu vlastností povrchových EMG vln v jednorozměrných polonekonečných periodických strukturách byly vyvinuty efektivní numerické přístupy, které využívají symplektickou matici [15]. Tento postup umožňuje odvozovat vlastní frekvence f_m pro povrchové EMG vlny s dostatečně vysokou přesností. Použití uvedené metody přispělo k efektivnímu modelování a analýze povrchových EMG vln nejen v homogenních periodických strukturách [15], ale také ve strukturách obsahujících defekty [15].

Dynamická odezva periodických struktur a metamateriálů může být predikována pomocí metod WFE (wave finite element) a FE (finite element) [16]. Zatímco metoda WFE se uplatňuje především při analýze jednorozměrných struktur, metoda FE je vhodná pro složitější 2D a téměř periodické systémy [16]. Tyto přístupy umožňují analýzu lokálních rezonancí a efektů zakázaných pásem, které mají zásadní vliv na vlastnosti šíření vlny uvnitř nebo podél periodických struktur [10].

Interakce mezi elektronovými svazky, jako EMG vlnou a periodickými mikro nebo nano strukturami, je významná pro generování tzv. Smith-Purcellovy radiace [17]. Tento jev, při kterém dochází k transformaci vlastností nosičů náboje – elektronů na jinou formu elektromagnetického záření [18], je závislý na tvaru a velikosti mikro nebo nano struktur. Optimalizace těchto parametrů umožňuje zvyšování intenzity a koherence EMG záření, což má přímý vliv na efektivitu tzv. terahertzových zdrojů [18].

Numerické modely rozsáhlých periodických struktur nacházejí uplatnění v oblasti nanomateriálového inženýrství, nanoaplikací a dalších. Například při hodnocení elektromagnetických parametrů grafenových kompozitních struktur mají modely nezastupitelnou úlohu [19]. Takto sestavené modely umožňují modelování a experimentálně ověřit a ve svém dopadu validovat návrhy, přičemž výsledky poskytují podklady pro vývoj funkčních vzorků. Významné uplatnění nacházejí rovněž vícevrstvé grafenové struktury, jejichž specifické elektromagnetické vlastnosti otevírají nové možnosti v oblasti nanoelektroniky, senzorů a dalších komponent [5, 20].

Environmentální rastrovací elektronové mikroskopy [21] se zaměřují na zkoumání nevodivých a vzorků s obsahem H_2O , přičemž jedním z klíčových parametrů je hodnocení trajektorií sekundárních elektronů [22]. Tvar a velikost otvorů v okolí elektronového svazku, například Lavalových dýz [22, 23, 24] ovlivňují tlakové gradienty

a tím i efektivitu detekce elektronů [22]. Optimalizace těchto parametrů umožňuje zlepšení vlastností scintilačních detektorů [25].

Prof. Delong popisuje raný vývoj elektronové mikroskopie v Československu, zahrnující konstrukci prvních přístrojů a jejich význam pro vědní obor. Přehled produkce českých elektronových mikroskopů a bibliografická data poskytují cenný kontext historického vývoje a jeho vlivu na současné technologie [26]. Prof. Delong také dokončil environmentální mikroskop [27] jako jeden z mála na světě.

2 Základní pojmy a principy elektronové mikroskopie

2.1 Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie umožňuje zobrazování vzorků s rozlišením na úrovni nanometrů, což je mnohonásobně větší zvětšení než u světelných mikroskopů [28]. Důvodem je jednoduše velikost vlnové délky EMG pole primárního svazku mikroskopu [1].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Pro výpočet vlnové délky elektronu ve svazku urychleném napětím U_{AK} použijeme de Broglieho vztah, který zohledňuje hybnost elektronu:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e e U_{AK}}}, \quad (2.2)$$

kde λ je vlnová délka v metrech, h je Planckova konstanta, m_e je klidová hmotnost elektronu, e je jeho náboj a U_{AK} je urychlovací napětí ve voltech.

Tento vztah vychází z de Broglieho hypotézy, která tvrdí, že každá částice, včetně elektronu, má vlnové vlastnosti [29]. Vztah pro vlnovou délku je odvozen na základě hybnosti částice.

1. Výpočet kinetické energie elektronů:

Kinetická energie E_k elektronu urychleného napětím U_{AK} je dána vztahem:

$$E_k = eU_{AK}, \quad (2.3)$$

2. Výpočet rychlosti elektronů:

Na základě kinetické energie E_k vypočítáme rychlost v elektronu:

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_e}}, \quad (2.4)$$

3. Výpočet hybnosti elektronů:

Hybnost p elektronu je součin jeho hmotnosti a rychlosti:

$$p = m_e v, \quad (2.5)$$

4. Výpočet vlnové délky:

Konečná vlnová délka se spočítá jako:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (2.6)$$

Na rozdíl od světelných mikroskopů [28], které používají viditelné světlo k osvětlení vzorku, elektronové mikroskopy využívají pohyb elektrických nábojů – elektronů, urychlených elektrickým polem a soustředěných ve svazku, který má podstatně kratší vlnovou délku (2.1) než svazek světelné vlnové délky ($\lambda \in \langle 440; 750 \rangle$ nm). Tato vlastnost umožňuje elektronovým mikroskopům dosáhnout úměrně vyššího rozlišení obrazu, dnes typicky na úrovni jednotek nanometrů [1]. Elektrony ve svazku jsou urychlovány stabilním elektrickým napětím U_{AK} , které se pohybuje obvykle od řádově jednotek kilovoltů až do stovek kilovoltů, čímž je dosaženo jak jejich dostatečné energie k interakci s materiálem, tak dalších parametrů svazku. Elektromagnetické pole v elektronové mikroskopii slouží k formování a řízení svazku elektronů [1]. Hlavním prvkem pro formování svazku, který se v tomto procesu využívá, jsou tzv. elektromagnetické/elektrostatické čočky, které fungují na podobném principu jako optické čočky ve světelných mikroskopech [1]. Pomocí změny a směru vektorů intenzity elektrického E nebo magnetického H pole je možné svazek elektronů zaostřit či změnit jeho směr [1], [30].

2.2 Typy elektronových mikroskopů

Existují základní dva typy elektronových mikroskopů, které se liší principem fungování a aplikacemi: Přímé šíření elektronů – TEM (transmission electron microscope) a rastrovací elektronové mikroskopy – SEM (scanning electron microscope).

Transmisní elektronový mikroskop (TEM) je určen zejména pro zkoumání vnitřní struktury materiálů. U tohoto typu mikroskopu procházejí elektrony tenkým vzorkem, což umožňuje detekci a analýzu obrazů s extrémním rozlišením [1]. TEM se často používá v materiálových vědách, biologii a nanotechnologiích, neboť dokáže poskytnout informace o stavbě a uspořádání vzorku hmoty, například krystalické struktury a morfologii vzorku. Hlavní nevýhodou TEM je potřeba vzorky upravit, a to na velmi tenké vrstvy [30].

Řádkovací (rastrovací) elektronový mikroskop (SEM) umožňuje zobrazování povrchových struktur vzorků. V SEM elektrony skenují povrch vzorku a interagují s ním, čímž se vytvářejí sekundární elektrony, které jsou detekovány a vyhodnocovány jako obraz. SEM obvykle poskytuje nižší rozlišení než TEM, ale je široce využíván v průmyslu, vědeckém výzkumu a biologii k analýze struktury povrchů, což zahrnuje materiálové vlastnosti a textury vzorků [1].

3 Šíření elektromagnetického pole a interakce vln

Elektromagnetické pole se šíří v prostoru ve formě vln, které jsou tvořeny oscilací elektrického a magnetického pole, například popsaného pomocí vektorů intenzit $\mathbf{E}$ a $\mathbf{H}$. Elektrická intenzita $\mathbf{E}$ a magnetická intenzita $\mathbf{H}$ jsou na sebe navzájem kolmé a jsou kolmé na směr šíření vlny ve směru n . Elektromagnetické vlny jsou popsány a vycházejí z redukovaných Maxwellových rovnic v Heavisidově notaci [31], které poskytují matematický základ pro analýzu jejich šíření v prostoru [32].

Harmonickou rovinnou vlnu šířící se prostorem lze popsat vztahem:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t + \alpha), \quad (3.1)$$

kde $\mathbf{k}$ je vlnový vektor, $\mathbf{E}_0$ je amplituda intenzity elektrického pole, $\mathbf{r}$ je polohový vektor bodu, v němž je definována intenzita $\mathbf{E}$ a $\omega = 2\pi f$ je úhlový kmitočet, kde f je frekvence.

Ve vakuu se vlna šíří rychlostí světla c , kterou lze vyjádřit v závislosti na parametrech prostředí jako:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (3.2)$$

kde μ_0 je magnetická permeabilita vakua a ϵ_0 je elektrická permitivita vakua [32]. Elektromagnetické vlny dále mohou měnit vlastnosti na rozhraní rozdílných elektromagnetických prostředí a můžeme mluvit o odrazu a lomu při přechodu mezi dvěma prostředími s indexy 1 a 2. Tuto interakci popisuje Snellův zákon [33] pro elektromagnetické vlny:

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_2} = \frac{\mathbf{k}_2}{\mathbf{k}_1} = \frac{\sqrt{j\omega\mu_2(\gamma_2 + j\omega\epsilon_2)}}{\sqrt{j\omega\mu_1(\gamma_1 + j\omega\epsilon_1)}}, \quad (3.3)$$

kde $\mathbf{k}$ je komplexní vlnové číslo, podle indexu 1 v prvním a indexu 2 v druhém prostředí, μ je magnetická permeabilita prostředí podle indexu 1, 2, γ je měrná vodivost prostředí podle indexu 1, 2, ϵ je elektrická permitivita prostředí podle indexu 1, 2, θ_0 je úhel dopadu a θ_2 je úhel lomu [33].

Elektronové paprsky mohou být zaostřovány a rozptylovány stejně jako paprsky světla. Vlnová délka elektronů je spojena s jejich kinetickou energií w_e . Tu lze vyčíslit prostřednictvím de Broglieho rovnice [29], která říká, že vlnová délka je nepřímo úměrná hybnosti nosiče náboje. Pokud vezmeme v úvahu relativistické efekty, protože rychlost elektronů je podstatná část rychlosti světla, pak je vlnová délka elektronu rovna:

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2m_0 w_e \left(1 + \frac{w_e}{2m_0 c^2}\right)}}, \quad (3.4)$$

kde h je Planckova konstanta, m_0 je klidová hmotnost elektronu a w_e je kinetická energie elektronu. Interakce svazku elektronů s elektromagnetickým polem způsobuje pohyb elektronů podle pravidla levé ruky. Díky interakci je umožněna manipulace se svazkem [32].

Pro výpočet vlnové délky elektronu ve svazku, který je urychlován napětím $\phi = 1000 \text{ V}$, lze použít následující vztah:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2me\phi \left(1 + \frac{e\phi}{2mc^2}\right)}}, \quad (3.5)$$

kde h je Planckova konstanta, m je hmotnost elektronu, e je náboj elektronu, ϕ je energie elektronu v elektronvoltech, která odpovídá urychlovacímu napětí ve voltech a c je rychlost světla ve vakuu [45].

3.1 Princip generování EMG vlny:

Na elektrický náboj q pohybující se v elektromagnetickém poli působí Lorentzova síla, která je dána vztahem:

$$\mathbf{f}_e = \rho(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (3.6)$$

kde $\mathbf{B}$ je vektor magnetické indukce v prostoru pohybujících se nábojů q s hustotou ρ , v je střední rychlost nábojů a $\mathbf{E}$ je intenzita elektrického pole. Vztah mezi magnetickou intenzitou $\mathbf{H}$ a magnetickou indukcí $\mathbf{B}$ je dán závislostí:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (3.7)$$

kde μ_r je relativní magnetická permeabilita. Vektor měrné síly, který působí na pohybující se náboje q_e se může vyjádřit jako:

$$\mathbf{f}_e = \frac{d(N_e q_e)}{dV} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_0 \times \mathbf{B}). \quad (3.8)$$

Tato síla působí na trajektorii náboje, nábojů, tedy i svazku náboje a tím dochází ke změně vektoru pohybu náboje. Pak se projeví jako oscilace náboje – elektronu [32], [34].

4 Periodické struktury

Periodické struktury jsou složeny z pravidelně se opakujících prvků, které při vhodných geometrických a materiálových parametrech interagují s okolním elektromagnetickým polem. Specifickým typem periodických struktur jsou takzvané metamateriály [39]. Ty vykazují z hlediska makroskopického pohledu na EMG pole takové vlastnosti, které nejsou běžné u přírodních materiálů (proto předpona meta-). Umožňují dosažení nových elektrických a magnetických parametrů. Prvním směrem využití bylo pro optické aplikace. Mezi tyto vlastnosti patří například záporná elektrická permitivita ($\epsilon < 0$) nebo záporná magnetická permeabilita ($\mu < 0$) materiálu, popřípadě obě. Vyjádření pro optickou oblast je možné jako záporný index lomu ($n < 0$) [35]. Metamateriály mají schopnost měnit parametry elektrické a magnetické složky EMG pole, nebo v oblasti šíření vlny například tokem světla.

Metamateriály mohou být vyrobeny z jedné nebo více vrstev struktur materiálů, a to z přírodních (např. grafen [20]) nebo anorganických látek.

4.1 Charakteristiky periodických struktur:

4.1.1 Geometrie

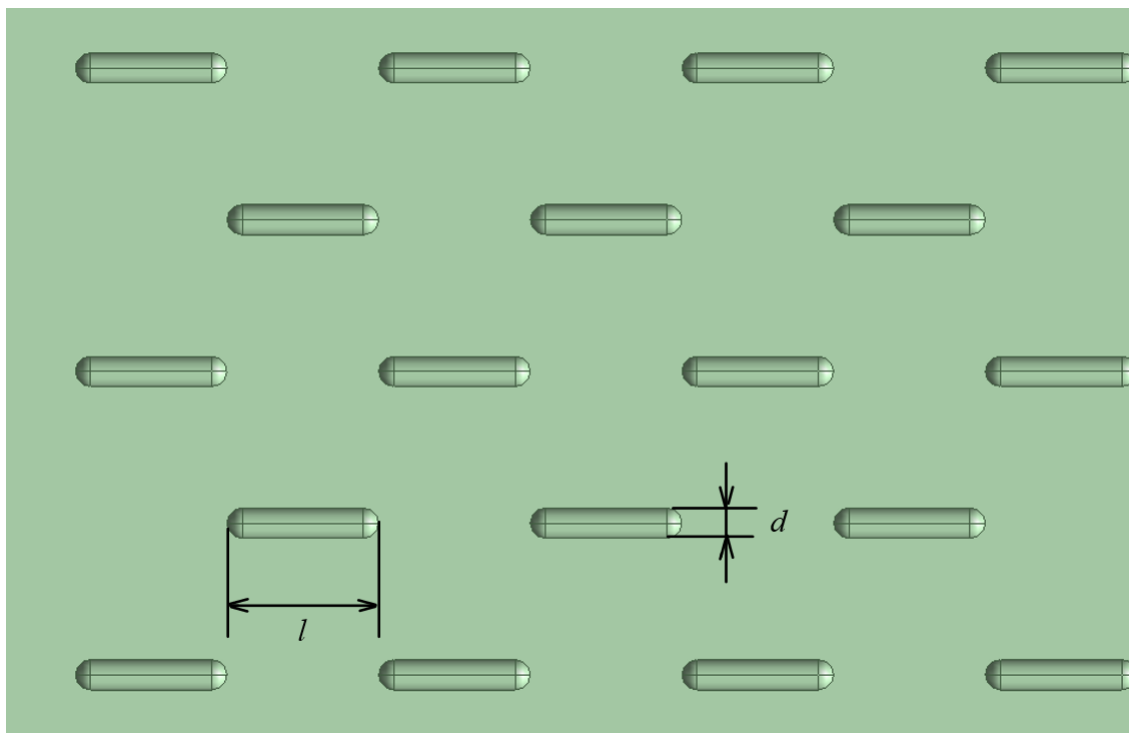
Geometrické parametry metapovrchu jsou šířka d , výška h , délka l a celkové uspořádání prvků určuje vliv struktury na šíření EMG vln. 4.1.

4.1.2 Použité materiály

Pro výrobu metamateriálů se využívá anorganických skupin měď Cu , zlato Au , platina Pt , stříbro Ag , hliník Al , křemík Si a další kovové nebo dielektrické prvky, nebo již kompozitní materiály a také organické materiály, jako je grafit. Ten se může použít v podobě grafenu, graphinu, nebo graphanu [36]. Tyto nově navržené uskupení pak ovlivňují elektromagnetické vlastnosti struktury.

4.1.3 Výroba

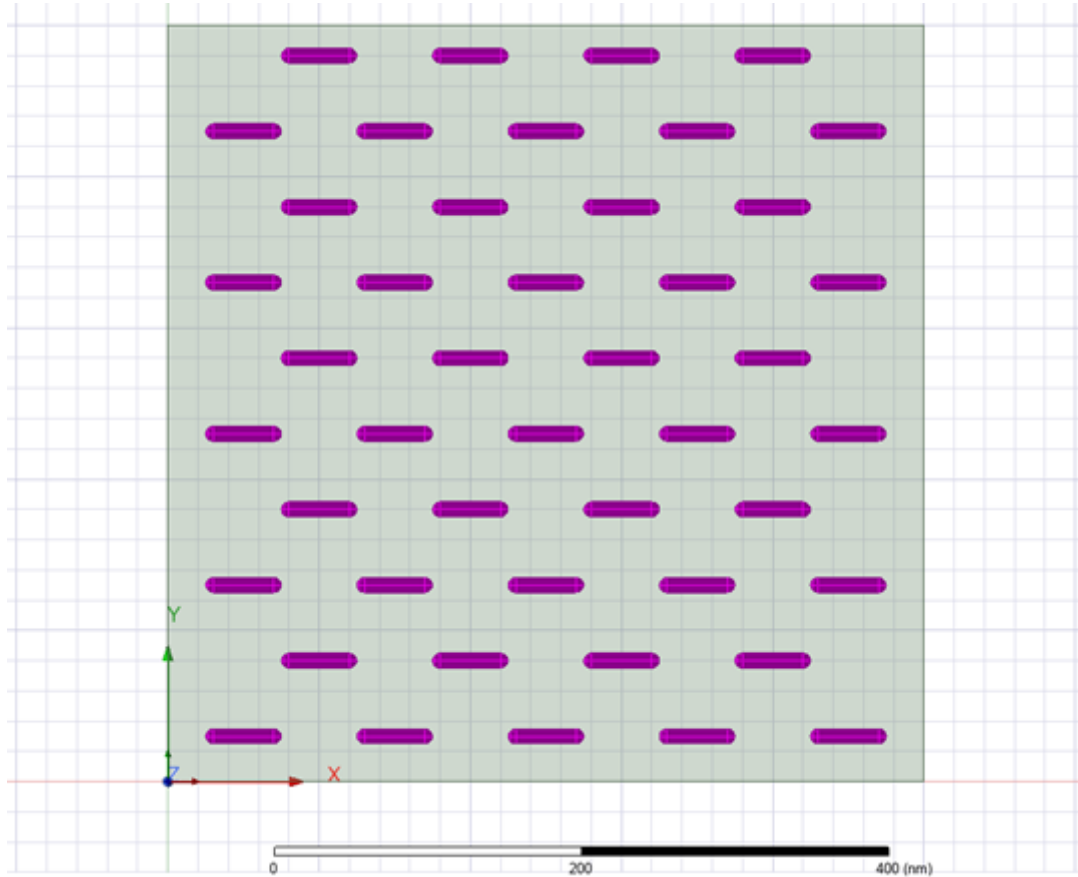
Návrh a výroba periodické struktury pro oblast velmi vysokých frekvencí bývá například při aplikaci zaostřeného iontového svazku (FIB – Focused Ion Beam), umožňuje přesný návrh prvků [36].



Obr. 4.1: Příklad periodického uspořádání inverzní struktury na substrátu (rozměry prvku: $d = 10$ nm, $h = 10$ nm, $l = 50$ nm)

5 Návrh numerického modelu

Navrhovaný numerický model s jeho geometrií (obr. 5.1) se zaměřuje na interakci elektronového svazku s metapovrchem, který mění vlastnosti šířící se EMG vlny. Cílem je navrhnout strukturu tak, aby ovlivnila a zlepšila parametry elektronového svazku. Například upravit parametry koherence, fázové stability nebo polarizace. Model je vytvořen tak, aby odpovídal reálným parametrům v elektronové mikroskopii a umožnil následnou optimalizaci svých geometrických parametrů.



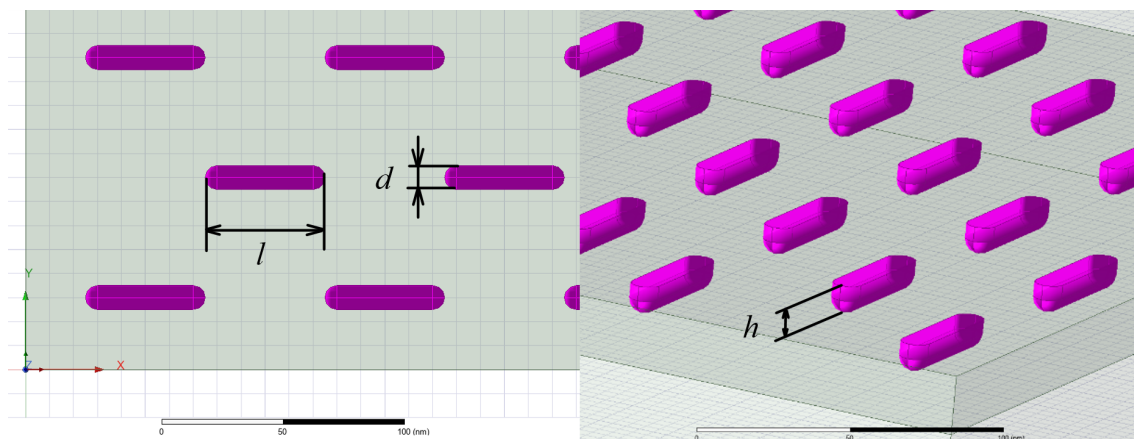
Obr. 5.1: Navržená geometrie a uspořádání periodické struktury

Parametry modelu jsou určeny následujícími požadavky. Elektronový svazek má napětí $U_{AK} = 1000 \text{ V}$ a energii $W_B = 1000 \text{ eV}$. Jeho frekvence první harmonické je $f_B = 2.418 \times 10^{17} \text{ Hz}$, což odpovídá vlnové délce $\lambda_B = 1.241 \times 10^{-9} \text{ m}$ podle vztahů (2.1 až 2.6). Substrát je navržen a plánován vyrobit z měděné fólie, která je potažena vrstvami zlata, platiny a oxidu india a cínu (ITO). Tyto vrstvy jsou voleny dle poskytnutých materiálů, z dostupnosti a požadavků modelu pro jejich vysokou vodivost a stabilitu, přičemž odolávají oxidaci. Periodická struktura je vytvořena

metodou odstranění materiálu pomocí FIB, což umožňuje vyhovující definování geometrie elementů struktury.

Rozměry prvků struktury jsou následující (obr. 5.2): Šířka elementu je $d_e = 10 \text{ nm}$, výška je $h_e = 10 \text{ nm}$ a délka je $l_e = 50 \text{ nm}$.

Použité materiály pro strukturu jsou zlato a grafit, zajišťující optimální elektromagnetické vlastnosti. Periodická struktura je tvořena inverzním způsobem. Ta nevytváří objekty nanášením, ale odstraňováním. Elementy jsou vytvořeny pomocí zaostřeného iontového svazku (FIB) na povrchu, na kterém jsou odstraněny atomy z požadovaných povrchových vrstev substrátu. Proces zahrnuje přípravu substrátu, který je tvořen měděnou fólií potaženou vrstvami zlata, platiny a ITO. Zaostřený iontový svazek o šířce $s_{ion} = 10 \text{ nm}$ je použit k vytvoření pravidelně uspořádaných struktur na povrchu. Tento postup umožňuje opakovatelnost vzorů, přičemž na substrátu o velikosti $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ může být vytvořeno až 10^6 prvků. Geometrie prvků je zobrazena na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Geometrie prvků struktury

Numerický model je navrhován v programovém prostředí ANSYS HFSS, které je využíváno pro analýzu elektromagnetických polí. Je uspořádán substrát, dva porty – vstupní a výstupní. Port vstupní vytvoří EMG vlnu s nastavenými parametry frekvence f_b . Pro simulaci vodivých vrstev jsou použity okrajové podmínky Perfect Electric Conductor (PEC). Pro modelování struktury jsou zavedeny periodické okrajové podmínky PBC (Periodic Boundary Conditions), PML (Perfectly Matched Layers) a další, které umožňují modelovat neomezené opakování struktury v daných směrech. Na okrajích simulační oblasti jsou aplikovány absorpční vrstvy PML, aby se minimalizovaly požadavky na nároky paměti, ale musí také splňovat podmínky minima (nulových) odrazů elektromagnetických vln.

Interakce elektronového svazku a pole je analyzována pomocí numerických analýz [23]. Jednotlivé kroky pro řešení modelu jsou následující:

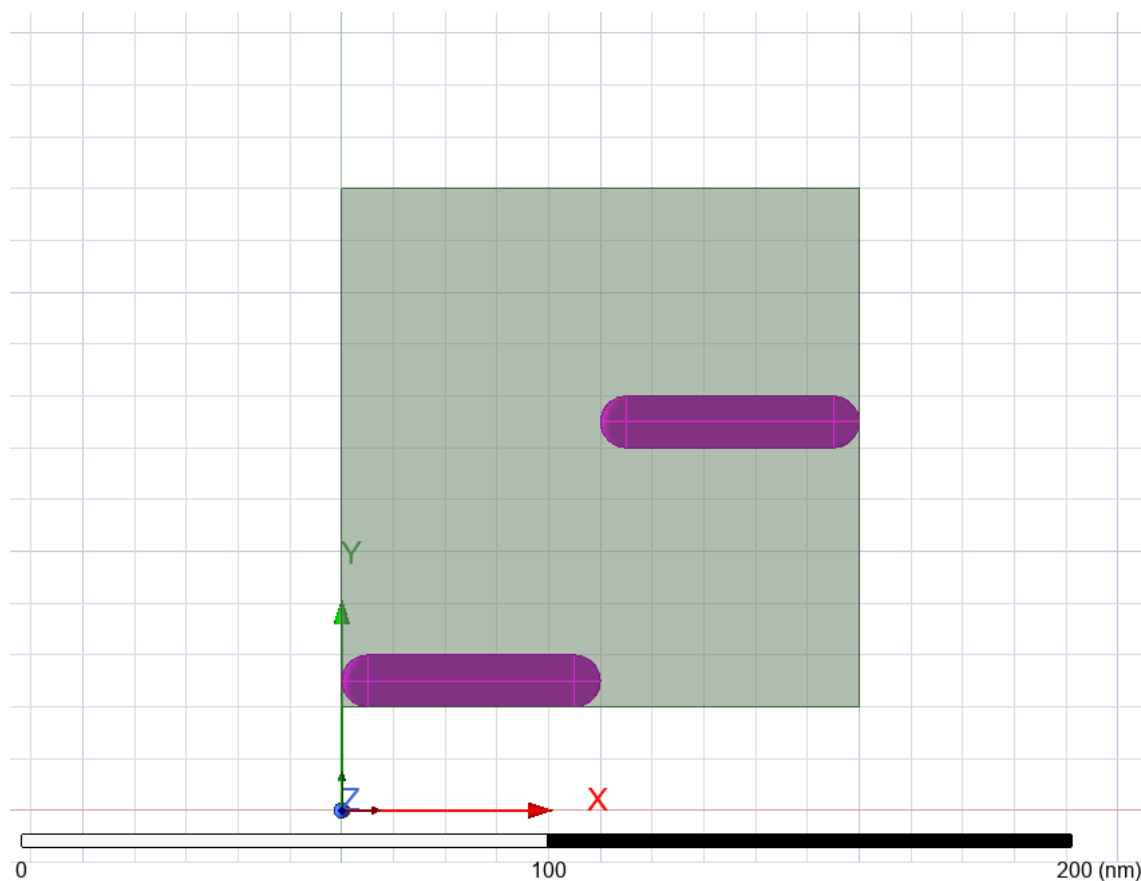
1. Geometrický model: Vytvoření trojrozměrné geometrie periodické struktury.
2. Výběr elementů: Výběr vhodného počtu elementů pro rozměr periodické struktury.
3. Nastavení parametrů v HFSS: Definice vstupního portu generujícího EMG vlnu a výstupního portu pro zachycení odezvy.
4. Nastavení frekvence: Modelovaná frekvence první harmonické je $f_B = 2,418 \times 10^{17}$ Hz.
5. Analýza interakce.

6 Postup analýzy numerického modelu

Cílem práce je nejen navrhnout numerický model periodické struktury, ale především analyzovat její vliv na parametry procházejícího elektronového svazku. K tomu je využito prostředí ANSYS HFSS.

6.1 Geometrie modelu

Za účelem snížení doby trvání simulace a výpočetní náročnosti byl model struktury minimalizován na co nejmenší počet prvků, viz obrázek 6.1, ale při zachování jeho periodických vlastností. Pro simulování periodicity struktury byly použity periodické okrajové podmínky.



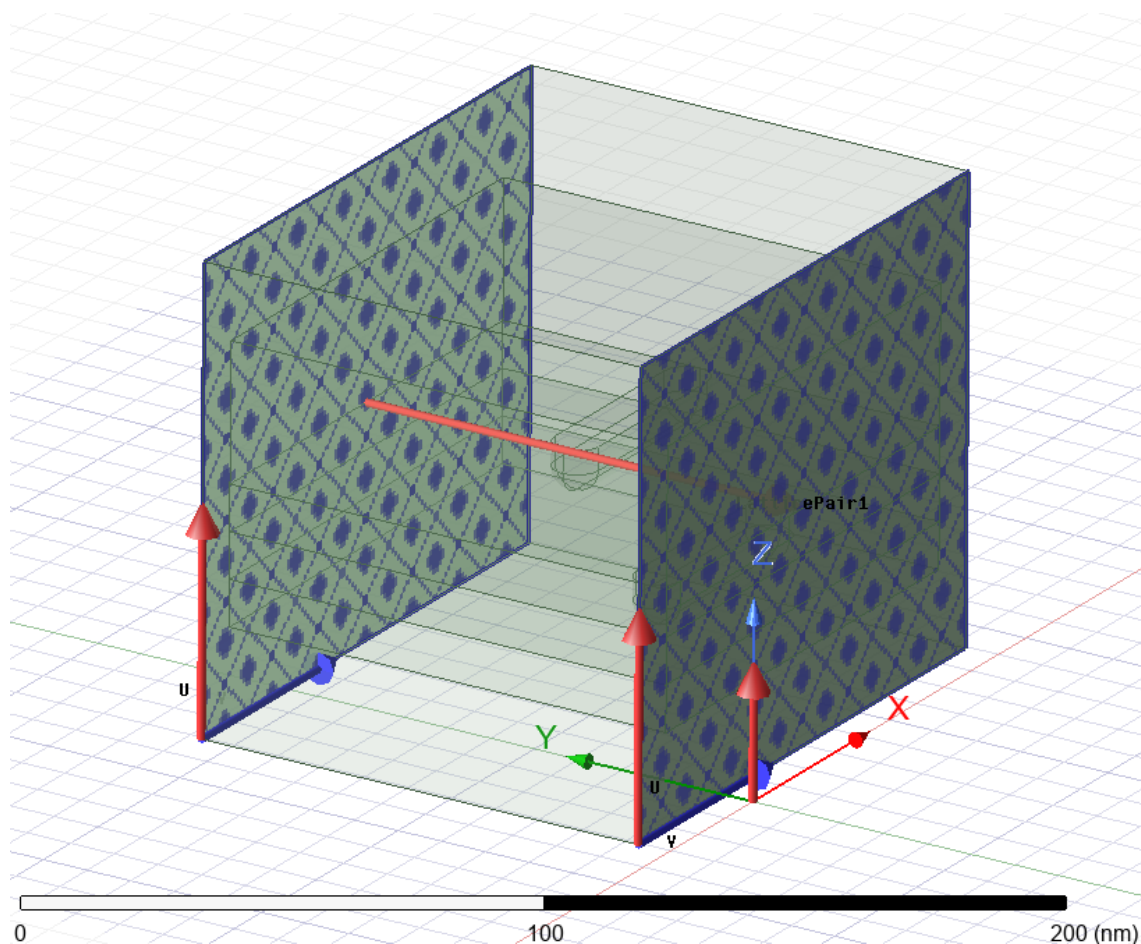
Obr. 6.1: Minimalizovaný model struktury

6.2 Nastavení okrajových podmínek

Okrajové podmínky pro periodičnost modelu byly zvoleny tak, aby zachovaly periodu podle x -ové a y -ové souřadnice. Podmínky slouží k tomu, aby se simulovaná základní buňka chovala z hlediska elektromagnetického pole tak, jako by byla součástí nekonečného dvourozměrného pole stejných, periodicky se opakujících buněk.

6.2.1 Lattice Pairs

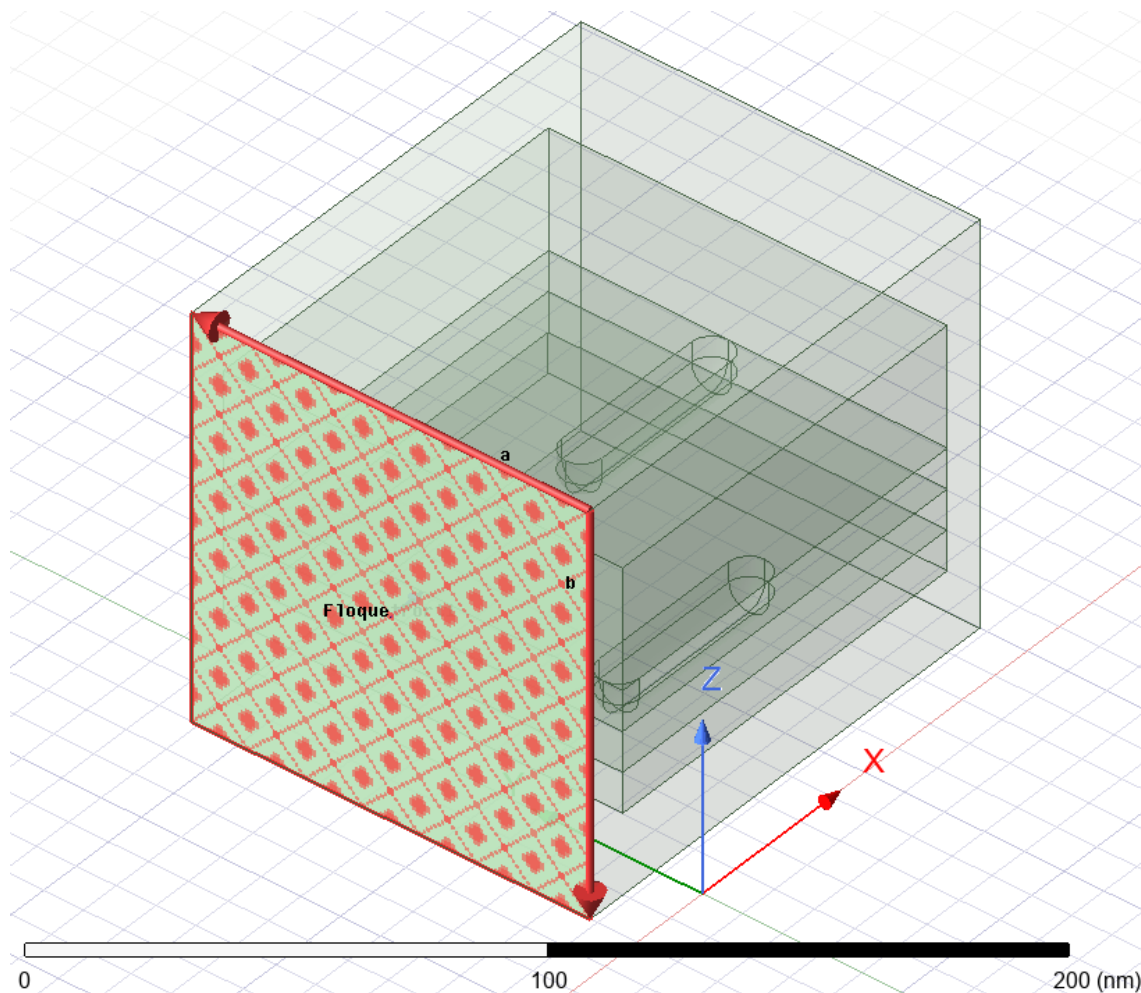
Pro periodické chování metapovrchu do směrů podél osy x a y byly použity párové mřížkové podmínky (Lattice Pairs). Tyto páry jsou přiděleny na protilehlé stěny v rovinách xz a yz , viz obr. 6.2.



Obr. 6.2: Párové podmínky Lattice Pair

6.3 Nastavení buzení modelu

Pro analýzu interakce elektromagnetické vlny s periodickou strukturou bylo použito buzení pomocí Floquet portů, jak je znázorněno na obrázku 6.3.

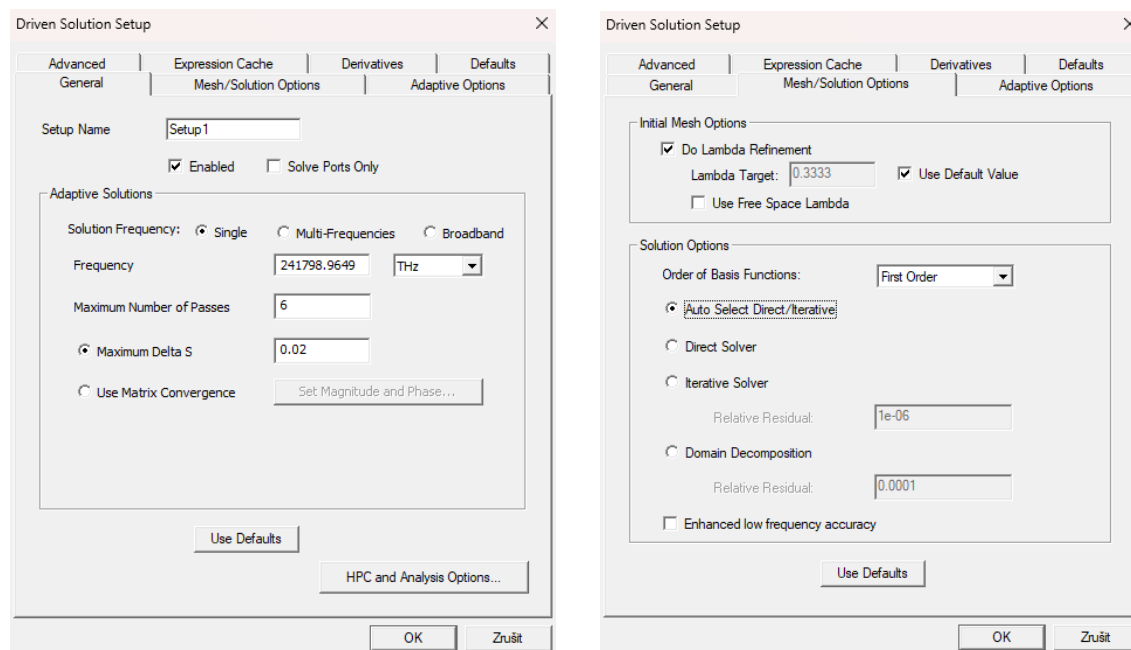


Obr. 6.3: Buzení struktury pomocí Floquet portů

Floquetovy porty reprezentují vstupní a výstupní roviny pro elektromagnetické vlny v modelu metapovrchu. Pro simulaci šíření vlny podél struktury byly modelu přiděleny dva Floquetovy porty na dvě protilehlé stěny ležící v rovině yz na hranici simulační oblasti.

6.4 Definice parametrů analýzy

Pro numerickou simulaci vlivu navrženého metapovrchu na EMG pole bylo definováno urychlovací napětí $U_{AK} = 1000 \text{ V}$, kterému odpovídá vlnová délka $\lambda_B = 1,2407 \times 10^{-9} \text{ m}$ a frekvence $f_B = 2,417989 \times 10^{17} \text{ Hz}$. Pro analýzu byl zvolen typ simulace HFSS s nastavením analýzy Modal Network. Frekvence pro výpočet byla nastavena podle f_B . Na obrázku 6.4 je nastavení analýzy v prostředí ANSYS HFSS.



Obr. 6.4: Nastavení analýzy

S cílem zrychlit výpočet byly měněny parametry analýzy, jako je omezení počtu průchodů, maximální delta S, nebo typ solveru iterační/přímý. Také bylo použito nastavení pro zjemňování sítě.

6.5 Stanice pro výpočet

Analýza numerického modelu je prováděna na výpočetní stanici, která má čtrnáctijádrový procesor, 64 GB operační paměti a operační systém Windows 10 Professional. ANSYS HFSS je zde nainstalován ve verzi 2024.

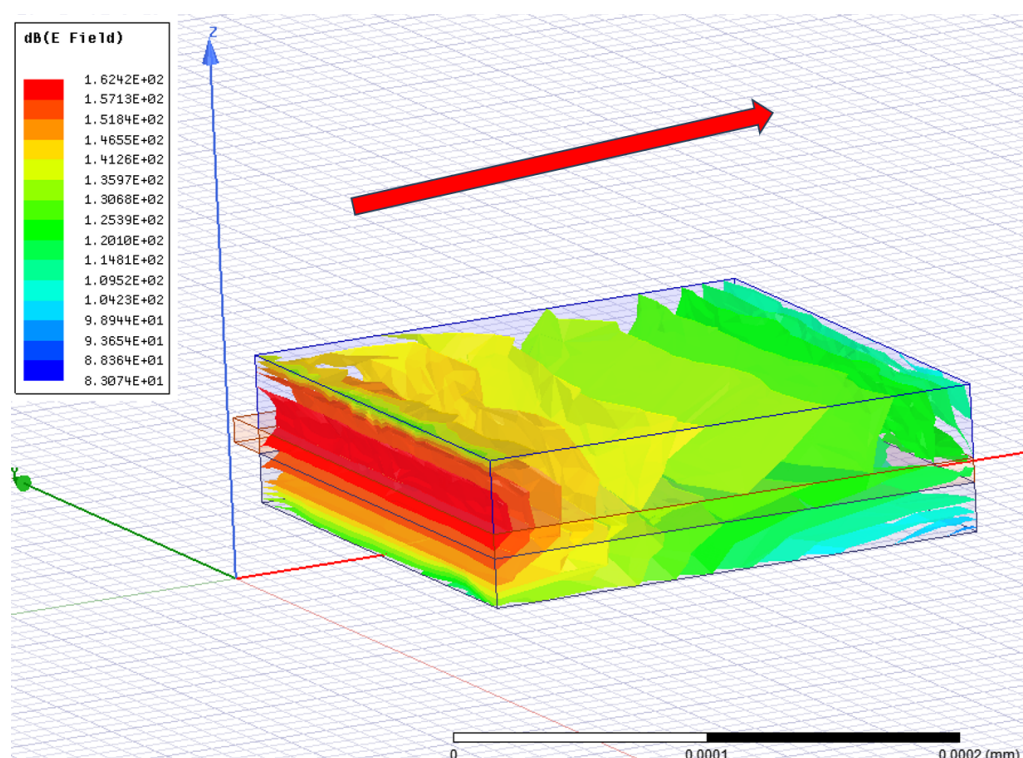
7 Očekávané výstupy

Hlavním výstupem práce je ověřený numerický model, ve kterém je znázorněno, jaký má vliv struktura na elektromagnetické pole v bezprostřední blízkosti elektronového svazku. Na základě předložených podkladových materiálů je očekáváno, že model jasně ukáže rozdíl v rozložení intenzit elektrického a magnetického pole.

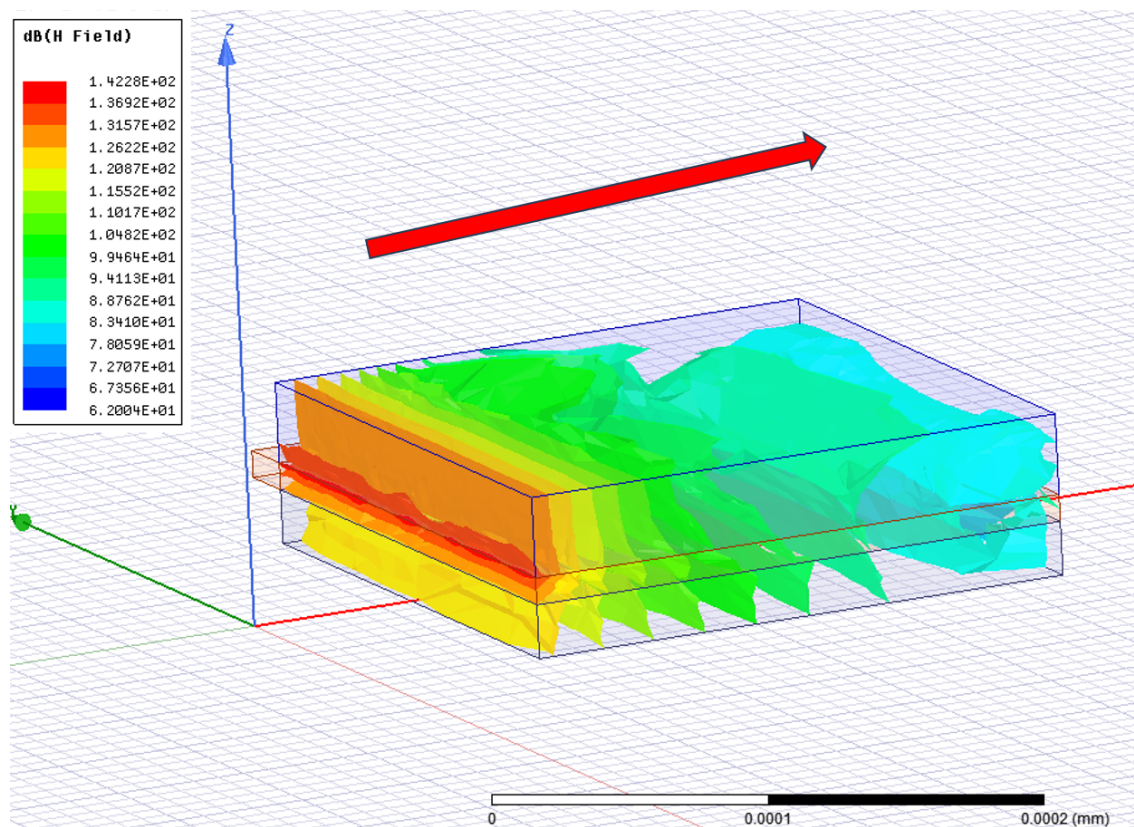
7.1 Rozložení EMG pole

Na obrázcích 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 lze pozorovat změny v rozložení intenzit elektromagnetického pole u metapovrchu v porovnání s hladkým substrátem. Červená šipka znázorňuje směr šíření elektronového svazku. Hladký substrát je zde použit pro demonstraci rozdílného chování EMG pole v porovnání s metamateriálem, který obsahuje opakující se elementy.

7.1.1 Hladký substrát

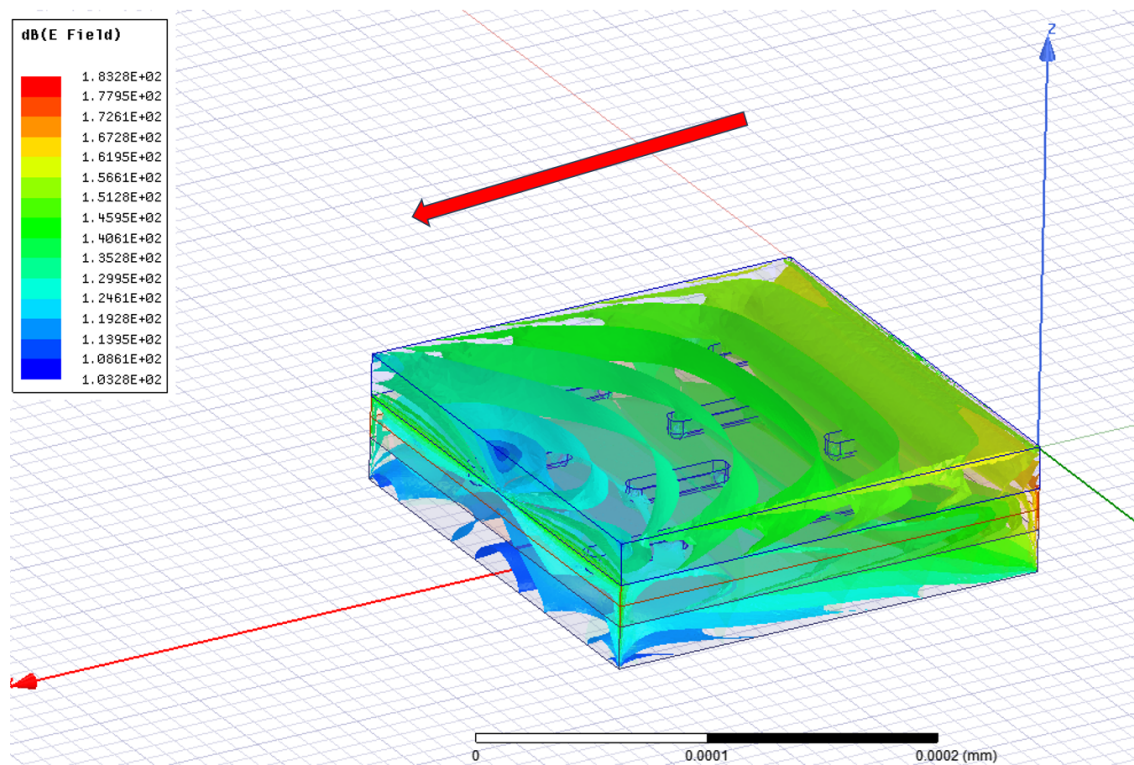


Obr. 7.1: Rozložení modulu intenzity elektrického pole u hladkého povrchu substrátu. (Převzato z: [37])

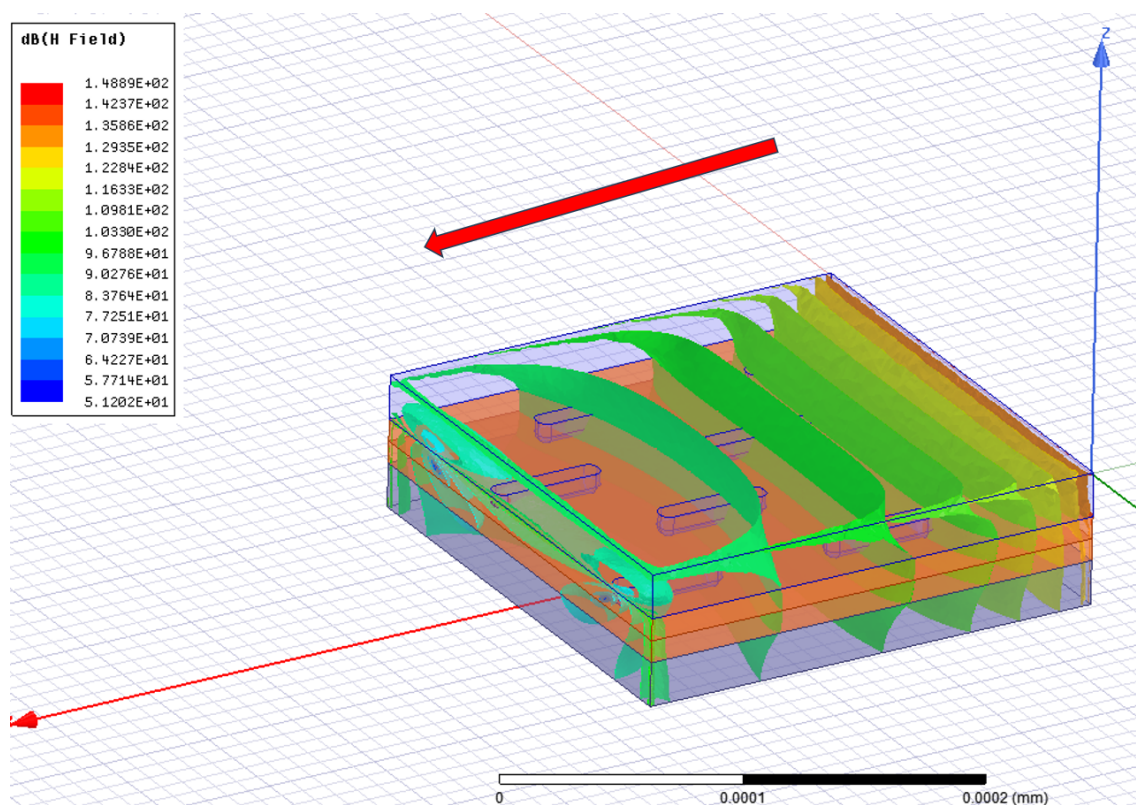


Obr. 7.2: Rozložení modulu intenzity magnetického pole u hladkého povrchu substrátu. (Převzato z: [37])

7.1.2 Metapovrch



Obr. 7.3: Rozložení modulu intenzity elektrického pole u metapovrchu. (Převzato z: [37])



Obr. 7.4: Rozložení modulu intenzity magnetického pole u metapovrchu. (Převzato z: [37])

8 Diskuze

Byl vytvořen numerický model pro základní test ovlivnění elektronového svazku. Pro prostudování základů numerického modelování a nástrojů s dostupnými metodami byl zvolen systém ANSYS s modulem HFSS. Ten je schopen analyzovat vysokofrekvenční modely do odpovídající frekvence vlnového modelu struktury nanomateriálu a elektronového svazku s parametry $U_{AK} = 1000 \text{ V}$ a energií $W_B = 1000 \text{ eV}$. Jeho frekvence první harmonické je $f_B = 2,418 \times 10^{17} \text{ Hz}$, což odpovídá vlnové délce $\lambda_B = 1,241 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Dosažené poznatky ukazují, že periodické struktury mohou měnit vlastnosti šíření elektromagnetického pole. Z obrázků 7.1, 7.2 je zřejmé, že šíření elektromagnetického pole nad hladkým substrátem není příliš uspořádané. Naopak u obrázků 7.3, 7.4 je jasně vidět určitým způsobem uspořádané a usměrněné šíření elektromagnetického pole nad periodickou strukturou, i přes nedokonalosti simulace na okrajích struktury.

Model struktury vytvářený v této práci byl podroben simulacím, ale kvůli HW omezením a prodloužení doby simulace nebyly získány výsledné výstupy. Očekávaným výstupem je podobné chování elektromagnetického pole nad metamateriálem, jako u demonstračních obrázků.

Závěr

Práce zahrnovala prostudování šíření elektromagnetického pole v blízké oblasti periodických struktur a návrh modelu periodické struktury v prostředí ANSYS HFSS. Byly analyzovány teoretické vlastnosti interakce elektronového svazku s periodickou strukturou, které naznačují vhodnost modelu pro další studie. Dále byly identifikovány vhodné parametry pro návrh a analýzu modelu, kterými jsou geometrické vlastnosti periodické struktury a její materiálové složení. Model je funkční, kvůli frekvenci elektronového svazku je velmi rozsáhlý a výpočetně náročný. Výsledky se kvůli časovým omezením stanice nepodařilo do odevzdání práce vyhodnotit a graficky zpracovat. Model byl ale úspěšně odladěn a sestaven. Čas na dokončení modelu se protáhl z důvodu HW omezení.

Literatura

- [1] JÄGER, A. a GÄRTNEROVÁ, V. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. Online. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky. 2017. Dostupné také z: <https://www.fzu.cz/aktuality/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>.
- [2] SHAW, M. P. a COMINS, N. R. ANALYTICAL ELECTRON MICROSCOPY IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. Online. Pergamon. Roč. 1986, s. 201-217. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080334547500176>.
- [3] YIN, Chang-Cheng. Structural biology revolution led by technical breakthroughs in cryo-electron microscopy. Online. Chinese Physics B. 2018, roč. 27, č. 5. ISSN 1674-1056. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/5/058703>.
- [4] AMELINCKX, S.; VAN DYCK, D.; VAN LANDUYT, J. a VAN TENDELOO, G. Electron Microscopy: Principles and Fundamentals. Wiley-VCH, 1997. ISBN 3527294791.
- [5] FIALA, P.; DREXLER, P.; NEŠPOR, D.; URBAN, R. Numerical Model of a Large Periodic Structure. In Proceedings of PIERS 2014 in Guangzhou. Progress In Electromagnetics. Guangzhou, Čína: 2014. p. 2350-2354. ISBN: 978-1-934142-28- 8. ISSN: 1559- 9450.
- [6] ANSYS, 1990-2011, manuál, Houston, USA.
- [7] PINHASI, Yosef; YAHALOM, Asher a PETNEV, Sergey. Propagation of ultra wide-band signals in lossy dispersive media. Online. 2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. 2008, s. 1-10. ISBN 978-1-4244-2097-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/COMCAS.2008.4562803>.
- [8] ARMAND, N. A. Propagation of broadband signals in dispersive media. Online. Journal of Communications Technology and Electronics. 2003, article 9, s. 957 – 969. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-9144243110&partnerID=40&md5=54abe6625bbe8f7ede1b68a316878ff9>.
- [9] Převzato z Applied Physics notes Unit II Wavepacket and wave equations. Online. Engineering Physics Semester I. S. 17. Dostupné z: <https://kdkce.ed>

u.in/writereaddata/fckimagefile/Applied%20Physics%20notes%20Unit%20II%20Wavepacket%20and%20wave%20equations.pdf.

- [10] SOLNTSEV, V. A. Characteristic equation and properties of electron waves in periodic structures. Online. Journal of Communications Technology and Electronics. 2012, roč. 57, č. 12, s. 1287-1296. ISSN 1064-2269. Dostupné z: <https://doi.org/10.1134/S1064226912120078>.
- [11] KASHANI, Zahra Ghattan; HOJJAT, Nasrin a SHAHABADI, Mahmoud. FULL-WAVE ANALYSIS OF COUPLED WAVEGUIDES IN A TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL. Online. Progress In Electromagnetics Research. 2004, roč. 49, s. 291-307. ISSN 1559-8985. Dostupné z: <https://doi.org/10.2528/PIER0404290>.
- [12] CAO, Qiong; SHEN, Weijin; ZUO, Sheng; LIN, Zhongchao; ZHAO, Xunwang et al. Online. 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2024. ISBN 979-8-3503-8996-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICMMT61774.2024.10671704>.
- [13] MYASIN; YEVGENY, A. a CHIGAREV, S.G. Modeling of the weak-relativistic electron beam diffractive radiation in open periodic structures. Online. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 1994, roč. 1994, s. 492 – 494. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0028757655&partnerID=40&md5=a50d8f06245ad0084a8d0dc3ece93896>.
- [14] TALEBI, Nahid. Interaction of electron beams with optical nanostructures and metamaterials: from coherent photon sources towards shaping the wave function. Online. Journal of Optics. 2017, roč. 19, č. 10. ISSN 2040-8978. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa8041>.
- [15] YAN, B. W.; TANG, Z. F. a GAO, Q. An accurate and efficient method for calculating surface waves in one-dimensional ideal and defective semi-infinite periodic structures. Online. Archive of Applied Mechanics. 2024, roč. 94, č. 10, s. 3027-3048. ISSN 0939-1533. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02656-9>.
- [16] MENCİK, J.-M. a DUHAMEL, D. Dynamic analysis of periodic structures and metamaterials via wave approaches and finite element procedures. Online. COMPDYN Proceedings. 2021. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120802609&partnerID=40&md5=73a9d67578c7eb312310a96cd1e69db8>.

- [17] POTYLITSYN, A.P. Smith–Purcell effect as resonant diffraction radiation. Online. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1998, roč. 145, č. 1-2, s. 60-66. ISSN 0168583X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00016-0).
- [18] ZHANG, Ping; SHU, Jing; LIANG, Bingyang; YANG, Shengpeng; WANG, Shaomeng et al. The study of micro-nano structure design for radiation excited by free electron beam. Online. 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2023, s. 1-2. ISBN 978-1-6654-7321-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IVEC56627.2023.10157744>.
- [19] [19] NASSWETTROVÁ, A.; FIALA, P.; NEŠPOR, D.; DREXLER, P.; STEINBAUER, M. Numerical Model a Graphene Component for the Sensing of Weak Electromagnetic Signals. In Proceedings of SPIE. Proceedings of SPIE. BELLINGHAM, WA 98227- 0010 USA: SPIE- INT SOC OPTICAL ENGINEERING, 2015. s. 1-10. ISBN: 978-1-62841-639- 8. ISSN: 0277- 786X
- [20] [20] FIALA, P. a MAXA, J. Numerical Models of a Multilayered Graphene Structure. Online. 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 2018, s. 527-532. ISBN 978-4-8855-2316-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598000>.
- [21] [21] Environmental Scanning Electron Microscopy and its Application Possibilities in ISI ASCR. Workshop of Interesting Topics of SEM and ESEM. Brno: Institute of Scientific Instruments AS CR, v. v. i, 2014, s. 11-13. ISBN 978-80-87441-12-1.
- [22] VYROUBAL, P.; MAXA, J.; NEDĚLA, V.; JIRÁK, J. a HLADKÁ, K. Advances in military technology. Online. 2006-, s. 59 – 69. Dostupné z: <https://doi.org/18022308>.
- [23] Maxa, J.; Šabacká, P.; Mazal, J.; Neděla, V.; Binar, T.; Bača, P.; Tálár, J.; Bayer, R.; Čudek, P. The Impact of Nozzle Opening Thickness on Flow Characteristics and Primary Electron Beam Scattering in an Environmental Scanning Electron Microscope. Sensors 2024, 24, 2166. <https://doi.org/10.3390/s24072166>
- [24] Šabacká, P.; Neděla, V.; Maxa, J.; Bayer, R. Application of Prandtl's Theory in the Design of an Experimental Chamber for Static Pressure Measurements. Sensors 2021, 21, 6849. <https://doi.org/10.3390/s21206849>

- [25] Maxa, J.; Neděla, V.; Šabacká, P.; Binar, T. Impact of Supersonic Flow in Scintillator Detector Apertures on the Resulting Pumping Effect of the Vacuum Chambers. *Sensors* 2023, 23, 4861. <https://doi.org/10.3390/s23104861>
- [26] DELONG, Armin a LENCOVÁ, Bohumila. Early history of electron microscopy in Czechoslovakia. Online. The Beginnings of Electron Microscopy - Part 1. *Advances in Imaging and Electron Physics*. 2021, s. 127-152. ISBN 9780323915076. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2021.08.006>.
- [27] Šabacká, P.; Maxa, J.; Bayer, R.; Vyroubal, P.; Binar, T. Slip Flow Analysis in an Experimental Chamber Simulating Differential Pumping in an Environmental Scanning Electron Microscope. *Sensors* 2022, 22, 9033. <https://doi.org/10.3390/s22239033>
- [28] LENG, Yang. Materials Characterization. Online. 2008. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470823002>.
- [29] De Broglieho hypotéza. Online. Encyklopedie fyziky. 2013. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/728-de-broglieho-hypoteza>.
- [30] Transmisní elektronový mikroskop. Online. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Transmisní%C3%AD_elektronov%C3%BD_mikroskop&oldid=24390578
- [31] Maxwellovy rovnice. Online. Katedra fyziky ČVUT. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/5_1.
- [32] Katedra fyziky povrchů a plazmatu MFF UK. Šíření elektromagnetických vln – Kapitola 5.3 [online]. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/5_3.
- [33] KADLEC, Radim a FIALA, Pavel. THE RESPONSE OF LAYERED MATERIALS TO EMG WAVES FROM A PULSE SOURCE. Online. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2015, roč. 42, s. 179-187. ISSN 1937-8726. Dostupné z: <https://doi.org/10.2528/PIERM15042904>.
- [34] P. Fiala, “Výkonový mikrovlnný impulsní generátor s virtuální katodou,” Teze, VUT Brno, 2008.

- [35] SOUKOULIS, Costas M.; LINDEN, Stefan a WEGENER, Martin. Negative Refractive Index at Optical Wavelengths. Online. Science. 2007, roč. 315, č. 5808, s. 47-49. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.1136481>.
- [36] Fiala, P, Optické biosenzory s nanomateriálovými strukturami, Brno University of Technology (2018).
- [37] P. Fiala, “Model struktury – návrh,” Interní podklad, VUT Brno, 2024.
- [38] DĚDEK, L, DĚDKOVÁ, J. Elektromagnetismus. 2. vyd. Brno: VITIUM, 2000. 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
- [39] CALOZ C.; ITOH T., Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, Willey – Interscience, 2005.
- [40] MARQUÉS, Ricardo; MARTÍN, Ferran a SOROLLA, Mario. Online. 2007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470191736>.
- [41] SOLYMAR, L. a SHAMONINA, E. Waves in metamaterials. Oxford: Oxford University Press, 2009. ISBN 9780199215331. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=472162>.
- [42] PENDRY, J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. Online. Physical Review Letters. 2000, roč. 85, č. 18, s. 3966-3969. ISSN 0031-9007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>.
- [43] J.A. Stratton Teorie elektromagnetického pole, SNTL, 1944.
- [44] BAYER, Robert; MAXA, Jiří a ŠABACKÁ, Pavla. Energy Harvesting Using Thermocouple and Compressed Air. Online. Sensors. 2021, roč. 21, č. 18. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21186031>.
- [45] P.W. Hawkes, E. Kasper, Principles of electron optics. Vol. 3: Wave optics, Acad. Press, London [u.a], 1996.

Seznam symbolů a zkratek

EM	Elektronová Mikroskopie
EMG	Elektromagnetický
FEM	Finite Element Method (metoda konečných prvků)
HFSS	High Frequency Structure Simulator
HW	Hardware
WFE	Wave Finite Element
FE	Finite Element
TEM	Transmission Electron Microscope (transmisní elektronový mikroskop)
SEM	Scanning Electron Microscope (rastrovací elektronový mikroskop)
FIB	Focused Ion Beam (zaostřený iontový svazek)
ITO	Indium Tin Oxide (oxid india a cínu)
PEC	Perfect Electric Conductor
PBC	Periodic Boundary Conditions
PML	Perfectly Matched Layers
f_m	vlastní frekvence [Hz]
λ	vlnová délka [m]
c	rychlost světla [m/s]
f	frekvence [Hz]
μ_r	relativní permeabilita
h	Planckova konstanta [-]
m_e	klidová hmotnost elektronu
e	náboj elektronu
U_{AK}	urychlovací napětí [V]

E_k	kinetická energie elektronu
v	rychlost elektronu
p	hybnost elektronu
E	vektor intenzity elektrického pole
H	vektor intenzity magnetického pole
k	vlnový vektor
ω	úhlový kmitočet
r	polohový vektor
μ_0	permeabilita vakua
ϵ_0	permitivita vakua
γ	měrná vodivost
θ_0	úhel dopadu
θ_2	úhel lomu
w_e	kinetická energie elektronu
q	elektrický náboj
B	vektor magnetické indukce
ρ	hustota
μ_r	relativní permeabilita
W_B	energie el. svazku

A Obsah elektronické přílohy

Příloha obsahuje soubor "struktura_v7.1.aedt" s modelem struktury, který je spustitelný v programu Ansys Electronics Desktop verze 2024 R2.