

שם הקורס: חומרים מלאכותיים – שיטות אנליטיות בתווך מורכב

פרטי המרצה

שם: ד"ר יקיר חדד

חדר: 237 מעבדות חשמל

טלפון: 03-6406414

דוא"ל: hadady@eng.tau.ac.il

תאור כללי של הקורס

חומרים מלאכותיים הם מבנים מרוכבים שמתוכננים כך שתכונותיהם האפקטיביות תהינה שונות מתכונות החומרים מהם הם עשויים. לעיתים תכונות אלו יכולות להיות כאלה שלא ניתן למצוא כלל בטבע. חומרים מלאכותיים עשויים ממערכים, מסודרים או לא, של אלמנטים שבד"כ קטנים מאורך הגל בואקום, ובעלי מאפיינים שונים. אלמנטים אלו יכולים להיות עשויים מחומרים דיאלקטרים, מגנטיים, פלסמונים, לינארים או לא, וכן יכולים להתאפיין במגוון תדרי תהודה ומצבי התעוררות (מולטיפולים שונים). כאשר בונים חומר מלאכותי המבנה המתקבל הוא תווך מורכב. בשל מספר סקאלות הגודל בתווך המורכב, המידול שלו בכלים אנליטיים או נומריים סטנדרטים עשוי להיות מאתגר. מאידך, לאור שיכולות ננופבריקציה, והדפסה תלת-מימדית, תווכים מלאכותיים תופסים מקום נכבד במחקר העכשווי באופטיקה, מיקרוגל, ואף באקוסטיקה, ולכן כלים לאנליזה וסינטזה של חומרים אלה נעשים חשובים היום יותר מאי פעם. מטרת הקורס היא להציג מגוון שיטות מידול ואפיון חומרים מלאכותיים מסוגים שונים. הקורס יתמקד בחומרים אלקטרומגנטיים שרלוונטיים בעיקרם לאופטיקה ומיקרוגל, אך הכלים הנלמדים יכולים לשמש גם לטיפול במערכות אקוסטיות. הקורס הינו בעל אופי אנליטי בעיקרו ומטרתו להביא את הסטודנט לרמה שבה יהיה מסוגל לגשת לבעיית מידול חדשה באופן עצמאי.

נושאי הקורס

הערות	נושא	שבוע
Jackson, LL	הקדמה לנושא ומוטיבציה. מישוואות מקסוואל בחומר. יחסי חוקה. סוגי חומרים: אניזוטרופיים, בי-אניזוטרופיים, בי-אניזוטרופיים.	1
Jackson, LL	דיספרסיה זמנית. תכונות אנליטיות של סופטביליות חשמלית ומגנטית. אנרגיה בתווך דיספרסיה. יחסי Kramers-Kroning. דיספרסיה מרחבית.	2
Ishimaru	טיפול כללי בגלים מישוריים בתווך בי-אניזוטרופי. דוגמה: גלים במגנטופלסמה (אניזוטרופי דיספרסיה) – "Whisler Mode". גלים מישוריים המתפשטים במקביל לשדה סטטי ממגנט. משפט הדדיות של לורנץ.	3
Tretyakov	מידול שכבות דקות ומשטחים. הקדמה. הגדרת המושג "Locally quasi-static", פיתוח מישוואות קו תמסורת וקטוריות. פיתוח תנאי אימפדנס לשכבה דקה. דוגמה: מוליך גל ריבועי ממולא חלקית.	4
Tretyakov	מידול ממשקים בין תווכים. מודלים מסדר גבוה של אימפדנס משטחי. מודלים למוליכים "טובים", אופרטור אימפדנס מדויק, וקרוביו.	5



Tretyakov	מידול מבנים מחזוריים ומערכים. משפט Floquet, הרמוניות Floquet, השוואה לשריג של גביש בחומר טבעי. דוגמה: מערך מחזורי של חוטי זרם. תנאי שפה ממוצע עבור מערך חוטים, והכללה למבנים אחרים. מערכים משטחיים צפופים של חלקיקים, מושג השדה הלוקלי, שימור אנרגיה והחלק הדמיוני של קבוע האינטרקציה.	6-7
Ishimaru, Novotny, Born & Wolf	מושג הקיטוביות כאבן בניין. חישוב דרך תורת Mie המדוייקת לכדור דיאלקטרי, השוואה לפתרון קוואזי סטטי עם תיקון קרינה. קיטוביות מתוקנת בתווך לא הומוגני. דוגמה: קיטוביות של כדור דיאלקטרי מעל משטח עשוי מוליך מושלם. מאפייני מטריצת הקיטוביות לחלקיק כלשהו, חשמלי או מגנטי. חתך פיזור, בליעה, והכחדה במונחי קיטוביות.	8-9
Tretyakov	חומרים מרוכבים. מודל Maxwell Garnett. שדות מקומיים וממוצעים. פורמוליציית Maxwell Garnett ו Clausius-Mossotti. הפסדי פיזור.	10
Tretyakov, Pozar	חומרים מרוכבים מחזוריים. מודל קו תמסורת עם העמסה מחזורית. קשרי דיספרסיה ותכונות אפקטיביות. דוגמה לשימוש במודל בתווך חוטי. קשרי דיספרסיה, מקדם החזרה, דיספרסיה מרחבית. מקרה פרטי – מערך צפוף.	11
Tretyakov	חומרים מרוכבים. מידול קוואזי סטטי, דוגמה: תווך חוטי שבו החוטים אינם מוליכים מושלמים אלא מועמסים ראקטבית או לא לינארית.	12
Louisell	תווכים פרמטרים עם מודולציה בזמן. חוסר הדדיות ללא שדה מגנטי. Temporal coupled mode theory. סיכום.	13

קורסי קדם

שדות אלקטרומגנטיים. תמסורת גלים.

מדיניות ודרישות הקורס

במהלך הקורס ינתנו מספר תרגילי בית שמטרתם בעיקר להשלים את הלימוד בהרצאה. ישנה חובת הגשה על התרגילים האלו והם מהווים חלק מהציון הסופי. בסוף הקורס תהיה עבודה מסכמת שתהווה את החלק הארי בציון.

מרכיבי הציון

מרכיב	אחוז מהציון
תרגילי בית – 4-5 סה"כ.	30%
תרגיל מסכם.	70%

ספרות הקורס

1. J. D. Jackson , *Classical Electrodynamics*. Wiley: New York, 1998.
2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, *Electrodynamics of Continuous Media*. Pergamon: 1984.
3. S. Tretyakov, *Analytical Modelling in Applied Electromagnetics*. Attech House: Boston, 2003.
4. D. M. Pozar, *Microwave Engineering 2nd Ed.*. Wiley: 1998.
5. A. Ishimaru, *Electromagnetic wave propagation*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ, 1991.
6. E. Born, M. Wolf, *Principles of optics*. Cambridge University Press 1980.
7. W. H. Louisell, *Coupled mode and parametric electronics*. Wiley 1960.

Artificial materials – analytical methods in complex media

Syllabus

Week	Topic	Comm
1.	Introduction and motivation. Maxwell's equations in media. Constitutive relations. Anisotropy, Bi-isotropy, Bi-Anisotropy.	Jackson, LL
2.	Temporal dispersion. Analytic properties of the electric and magnetic susceptibilities. Energy in dispersive medium. Kramers-Kroning relations. Spatial dispersion.	Jackson, LL
3.	Plane waves in Bi-anisotropic media. Example: waves in magnetoplasma (anisotropic and dispersive) – the "Whisler Mode". Plane waves that propagate parallel to DC magnetic bias field. Lorentz reciprocity theorem.	Ishimaru
4.	Modelling of thin layers and sheets. Introduction. The concept of "locally quasi-static". Vector transmission line equations. Derivation of impedance condition for thin layers. Example: partially filled waveguide.	Tretyakov
5.	Modelling of interfaces between media. High order impedance models. Models for good conductors. Exact surface impedance operator, and approximations.	Tretyakov
6-7.	Modelling of periodic structures, arrays, and meshes. Floquet theorem, harmonics. Comparison to atomic crystals in natural materials. Example: array of parallel current lines. Averaged boundary conditions. Wire grids – generalizations. Dense array of particles. The notion of local field, energy conservation, and the imaginary part of the interaction constant.	Tretyakov
8-9.	Polarizability as a building block. Calculation through exact Mie theory for dielectric sphere, comparison to a quasi-static solution including radiation correction. Polarizability in inhomogeneous media. Example: dielectric sphere above perfect electric conductor. Characteristics of electric and magnetic polarizability. Scattering, absorption, and extinction cross sections and connection to polarizability of small inclusions.	Ishimaru, Novotny, Born & Wolf
10.	Composite materials. The Maxwell Garnett model. Local and averaged fields. Clausius-Mossotti and Maxwell Garnett formulations. Scattering loss.	Tretyakov
11.	Periodic composite materials. Transmission line with periodic loading. Dispersion, effective parameters. Example in wire media. Temporal and spatial dispersion, reflection coefficient from half-space. Special case: dense array.	Tretyakov, Pozar
12.	Composite materials. Quasi-static modelling. Example: wire media with wires that are not perfect conductors but are loaded reactively, or nonlinearly.	Tretyakov
13.	Parametric media with temporal modulation. Magnet-less non-reciprocity. Temporal coupled mode theory. Conclusions.	Louisell