

METALENS ANTENA 24 GHZ UNTUK BEAM STEERING PASIF

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Elektro



Disusun Oleh:

Gregorius Pascal Foster Sianturi

E.5051.2102538

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNIK DAN INDUSTRI
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

2025

HALAMAN HAK CIPTA

METALENS ANTENA 24 GHZ UNTUK BEAM STEERING PASIF

Oleh
Gregorius Pascal Foster Sianturi

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik pada Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri

© Gregorius Pascal Foster Sianturi 2025
Universitas Pendidikan Indonesia
Agustus 2025

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang.
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis

LEMBAR PENGESAHAN

Gregorius Pascal Foster Sianturi

E.5051.2102538

METALENS ANTENA 24 GHZ UNTUK BEAM STEERING PASIF

Disetujui dan disahkan oleh:

Dosen Pembimbing I



Dr. Agus Heri Setya Budi, S.T., M.T.

NIP. 197208262005011001

Dosen Pembimbing II



Nurul Fahmi Arief Hakim, S.Pd., M.T.

NIP. 920200419930905101

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Didin Wahyudin, S.Pd., M.T., Ph.D.

NIP. 197608272009121001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “***Metalens Antena 24 GHz untuk Beam Steering Pasif***” ini beserta seluruh isinya adalah karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau klaim dari pihak lain terhadap karya saya ini.

Bandung, 25 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,

Gregorius Pascal Foster Sianturi

NIM. 2102538

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Metalens Antena 24 GHz Untuk Beam Steering Pasif*” ini dengan baik dan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak James Sianturi, S.Pd. dan Ibu Riani Manik, M.Pd. selaku kedua orang tua penulis, yang senantiasa memberikan dukungan, doa, dan motivasi selama penulis menyelesaikan skripsi.
2. Kakak Evelyne Rosalia Monica Sianturi, S.T. yang selalu memberikan dukungan pada penulis.
3. Bapak Dr. Agus Heri Setya Budi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I yang telah membantu serta membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi.
4. Bapak Nurul Fahmi Arief Hakim, M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah membantu serta membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi.
5. Bapak Ashif Aminulloh Fathnan, Ph.D. selaku dosen pembimbing eksternal yang telah membantu serta membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi.
6. Bapak Didin Wahyudin, Ph.D. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro.
7. Bapak Didin Wahyudin, Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan serta arahan untuk segala urusan perkuliahan.
8. Seluruh dosen dan staff Teknik Elektro UPI yang telah memberikan pengalaman hebat selama perkuliahan.

9. Raihan Satria Gamas, Kevin Kennedy dan seluruh teman TE-01 dan rekan-rekan konsentrasi Telekomunikasi UPI.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca demi perbaikan laporan ini di masa yang akan datang. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi yang berguna bagi para pembaca.

Bandung, 25 Juli 2025

Penulis

Gregorius Pascal Foster Sianturi

ABSTRAK

Antena pada sistem radar dan komunikasi frekuensi tinggi seperti 24 GHz rentan terhadap interferensi dan distorsi akibat objek sekitar maupun pantulan gelombang, yang dapat menurunkan kinerja pada aplikasi berakurasi tinggi seperti radar otomotif, penginderaan jarak jauh, dan komunikasi IoT. Solusi yang ditawarkan adalah *metalens* berbasis *metasurface* untuk *beam steering* pasif tanpa sistem aktif yang kompleks. Penelitian ini mencakup desain unit sel dengan kontrol fase transmisi berbasis distribusi hiperbolik, fabrikasi pada substrat berpermittivitas rendah, serta pengujian eksperimental. Unit sel mampu menghasilkan pergeseran fase hampir 360° dengan kesalahan $\pm 20^\circ$, sehingga mendukung distribusi fase kontinu. Hasil pengujian menunjukkan *metalens* membentuk fokus dengan efisiensi 31–68% pada 22–24 GHz. Distribusi fokus terukur konsisten dengan simulasi, meski ada pergeseran frekuensi puncak akibat toleransi fabrikasi dan konfigurasi pengukuran. Dengan struktur ringkas, ringan, dan bebas komponen aktif, *metalens* ini efektif mempersempit pola radiasi antena sekaligus berpotensi mudah diintegrasikan ke sistem radar dan komunikasi generasi berikutnya.

Kata kunci: *metalens*, *metasurface*, *beam steering* pasif, hiperbolik, fokus kontrol.

ABSTRACT

Antennas in radar and high-frequency communication systems such as 24 GHz are prone to interference and distortion from surrounding objects and wave reflections, which can degrade performance in high-accuracy applications such as automotive radar, remote sensing, and IoT communication. A proposed solution is a metasurface-based metalens for passive beam steering without complex active systems. This research involves unit cell design with transmission phase control based on a hyperbolic phase distribution, fabrication on a low-permittivity substrate, and experimental validation. The developed unit cell achieves nearly 360° phase shift with $\pm 20^\circ$ error, supporting a continuous phase distribution. Measurements show that the metalens forms a focus with efficiency of 31–68% across 22–24 GHz. The measured focal field distribution is consistent with simulations, although a slight peak frequency shift occurs due to fabrication tolerances and measurement setup. With a compact and lightweight structure free of active components, this metalens effectively narrows the antenna radiation pattern and offers strong potential for seamless integration into next-generation radar and communication systems.

Keywords: *metalens, metasurface, passive beam steering, hyperbolic, focusing.*

DAFTAR ISI

HALAMAN HAK CIPTA	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Metasurface</i> dan <i>Metalens</i>	5
2.1.1 Prinsip Kerja <i>Metalens</i>	5
2.1.2 <i>Beam Steering</i> Pasif Linear.....	8
2.1.3 <i>Beam Steering</i> Pasif Fokus	8
2.2 Konsep <i>Huygens</i> pada <i>Metalens</i>	9
2.3 Unit Sel <i>Metalens</i> dan Parameter Karakteristik	10
2.3.1 Desain Unit Sel	11
2.3.2 Karakteristik Unit Sel.....	13
2.4 Tinjauan Penelitian Terkait	14
BAB III METODE PENELITIAN.....	16
3.1 Desain Penelitian	16
3.2 Prosedur Penelitian.....	17
3.3 Teknik Pengambilan Data	19
3.3.1 Simulasi Perangkat Lunak.....	19
3.3.2 Pengukuran Fabrikasi.....	20
3.4 Analisis Data	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Desain <i>Metalens</i>	22

4.1.1	Desain Unit Sel	22
4.1.2	Kinerja Unit Sel.....	25
4.1.3	Struktur Penuh <i>Metalens</i>	28
4.1.4	Karakteristik Impedansi dan Admitansi <i>Metalens</i>	31
4.2	Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	32
4.2.1	Hasil Simulasi	32
4.2.2	Hasil Pengukuran	34
4.3	Perbedaan Hasil Simulasi dan Pengukuran	39
4.4.1	Perbandingan Letak Titik Fokus	39
4.4.2	Perbandingan Visual Kontrol Fase.....	42
4.4	Efisiensi Fokus <i>Metalens</i>	43
4.4.1	Hasil Performa <i>Metalens</i>	43
4.4.2	Analisis Efisiensi Fokus	45
BAB V KESIMPULAN DAN REKOMENDASI		49
5.1	Simpulan.....	49
5.2	Implikasi	50
5.3	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN.....		54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh <i>Metalens</i>	5
Gambar 2.2 Prinsip <i>Metalens</i>	6
Gambar 2.3 Sekma hukum Snell.....	7
Gambar 2.4 Skema <i>beam steering</i> fokus.....	9
Gambar 2.5 Contoh unit sel dari penelitian terdahulu	11
Gambar 2.6 Bentuk yang sering digunakan pada desain unit sel.....	12
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3.2 Skema simulasi menggunakan <i>plane wave</i>	20
Gambar 3.3 Skema pengukuran hasil fabrikasi.....	21
Gambar 4.1 Desain unit sel	22
Gambar 4.2 Tiga variasi desain yang digunakan	25
Gambar 4.3 Area cakupan fase dari masing-masing desain	26
Gambar 4.4 Struktur lengkap <i>metalens</i>	29
Gambar 4.5 Distribusi grafik.....	30
Gambar 4.6 Grafik Y_{ms} dan Z_{ms}	32
Gambar 4.7 Hasil simulasi <i>metalens</i>	33
Gambar 4.8 Konfigurasi pengukuran awal	34
Gambar 4.9 Hasil pengukuran pertama pada medan E-field	35
Gambar 4.10 Perubahan konfigurasi pengukuran kedua	36
Gambar 4.11 Hasil pengukuran kedua pada medan E-field.....	36
Gambar 4.12 Perubahan konfigurasi pengukuran ketiga	37
Gambar 4.13 Hasil pengukuran ketiga pada medan E-field	38
Gambar 4.14 Distribusi medan menjadi fokus ketika menggunakan <i>metalens</i>	44
Gambar 4.15 Letak titik fokus pada simulasi dan pengukuran.....	39
Gambar 4.16 Distribusi fase.....	42
Gambar 4.17 Grafik efisiensi fokus diberbagai frekuensi	45
Gambar 4.18 Perbedaan intensitas di area fokus	46
Gambar Lampiran 1. Distribusi magnitude dan fase antena tanpa <i>metalens</i>	56
Gambar Lampiran 2. Box lapis <i>absorber</i> pada pengukuran	57
Gambar Lampiran 3. <i>Probe</i> saat melakukan <i>scanning</i>	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	14
Tabel 4.1 Area cakupan fase dari ketiga desain	26
Tabel 4. 2 Ringkasan struktur unit sel yang mencakup fase 0°-360°	27
Tabel 4.3 Deviasi letak titik fokus	40
Tabel 4.4 Efisiensi fokus pada beberapa studi	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. SK Pembimbing.....	54
Lampiran 2. Pengukuran antena tanpa metalens.....	56
Lampiran 3. Dokumentasi pengukuran di BRIN	57
Lampiran 4. Lembar Perbaikan Penguji.....	58

DAFTAR PUSTAKA

- Banerji, S., Cooke, J., & Rodriguez, B. S. (2020). Impact of fabrication errors and refractive index on multilevel diffractive lens performance. *Scientific Reports*, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71480-2>
- Cao, S., Zhou, J., Li, R., & Xue, C. (2023). A Double-Layer Dual-Polarized Huygens Metasurface and Its Meta-Lens Antenna Applications. *Micromachines*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/mi14061139>
- Cui, Y. (2023). Phase Change Metamaterials for Fiber and Waveguide Integrated Compact Modulators with Built in Memory Functionality. *Aleph*, 87(1,2), 149–200.
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C> LUCINEIA CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/prooes
- Fathnan, A. A., Liu, M., & Powell, D. A. (2020). Achromatic Huygens' Metalenses with Deeply Subwavelength Thickness. *Advanced Optical Materials*, 8(22), 1–9. <https://doi.org/10.1002/adom.202000754>
- Ha, Y., Luo, Y., Pu, M., Zhang, F., He, Q., Jin, J., Xu, M., Guo, Y., Li, X., Li, X., Ma, X., & Luo, X. (2023). Physics-data-driven intelligent optimization for large-aperture metalenses. *Opto-Electronic Advances*, 6(11). <https://doi.org/10.29026/oea.2023.230133>
- He, Y., Song, B., & Tang, J. (2022). Optical metalenses: fundamentals, dispersion manipulation, and applications. In *Frontiers of Optoelectronics* (Vol. 15, Nomor 1). Higher Education Press. <https://doi.org/10.1007/s12200-022-00017-4>
- Hossain, M. B., Faruque, M. R. I., Islam, S. S., & Islam, M. T. (2021). Modified double dumbbell-shaped split-ring resonator-based negative permittivity metamaterial for satellite communications with high effective medium ratio. *Scientific Reports*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98703-4>
- Islam, K. M. R., & Choi, S. (2020). Compact double-layer fr4-based focusing lens using high-efficiency huygens' metasurface unit cells. *Sensors (Switzerland)*, 20(21), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s20216142>
- Jiang, X., Xue, C., Yan, J., Li, R., Li, T., & Gao, X. (2024). An Ultrathin, Dual-Band, and Dual-Polarized Metalens Antenna Based on Double-Resonant Huygens' Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(5), 1473–1477. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3359320>
- Kang, M., Ra'Di, Y., Farfan, D., & Alù, A. (2020). Efficient Focusing with Large Numerical Aperture Using a Hybrid Metalens. *Physical Review Applied*, 13(4), 1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.044016>
- Kim, S. J., Kim, C., Kim, Y., Jeong, J., Choi, S., Han, W., Kim, J., & Lee, B. (2021). Dielectric metalens: Properties and three-dimensional imaging applications. *Sensors*, 21(13). <https://doi.org/10.3390/s21134584>
- Kucharska, E. (2020). SS symmetry. *Mdpi*, 1–19.

- Lee, C., Ryu, Y., Noh, Y. H., Oh, I., Ha, J., & Yook, J. G. (2025). Ultra-Low-Cost Radar Cross Section Measurement and Validation Method Using a 3D-Printed Scale Model in a Non-Anechoic Chamber Environment. *IEEE Access*, 13, 41324–41335. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3544629>
- Liang, J. J., Wu, Z., Li, L., & Huang, Y. H. (2024). A high efficiency wideband co-polarised metalens antenna. In *IET Microwaves, Antennas and Propagation* (Vol. 18, Nomor 11, hal. 803–809). <https://doi.org/10.1049/mia2.12517>
- Liang, Y., Liu, H., Wang, F., Meng, H., Guo, J., Li, J., & Wei, Z. (2018). High-efficiency, near-diffraction limited, dielectric metasurface lenses based on crystalline titanium dioxide at visible wavelengths. *Nanomaterials*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/nano8050288>
- Liu, L., Zhang, X., Kenney, M., Su, X., Xu, N., Ouyang, C., Shi, Y., Han, J., Zhang, W., & Zhang, S. (2014). Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude. *Advanced Materials*, 26(29), 5031–5036. <https://doi.org/10.1002/adma.201401484>
- Liu, M., Zhu, W., Huo, P., Feng, L., Song, M., Zhang, C., Chen, L., Lezec, H. J., Lu, Y., Agrawal, A., & Xu, T. (2021). Multifunctional metasurfaces enabled by simultaneous and independent control of phase and amplitude for orthogonal polarization states. *Light: Science and Applications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00552-3>
- Liu, X., Wang, X., Wang, Y., Xiang, D., Zheng, L.-R., & Yang, G.-M. (2025). High-gain multiband metasurface antenna with frequency and polarization reconfigurability for millimeter-wave applications. *Optics Express*, 33(6), 14221. <https://doi.org/10.1364/oe.558906>
- Lou, Q., & Chen, Z. N. (2021). Sidelobe suppression of metalens antenna by amplitude and phase controllable metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(10), 6977–6981. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3076312>
- Meftah, N., Ratn, B., Korso, M. N. El, & Buroku, S. N. (2024). *Enhanced-Resolution Learning-Based Direction of Arrival Estimation by Programmable Metasurface* (hal. 9). *Advanced Electronic Materials*. <https://doi.org/10.1002/aelm.202400476>
- Qiu, Y., Deng, L., Zhan, Y., Li, G., & Guan, J. (2024). The Effect of Height Error on Performance of Propagation Phase-Based Metalens. *Micromachines*, 15(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/mi15040540>
- Sabri, R., Salary, M. M., & Mosallaei, H. (2021). Broadband continuous beam-steering with time-modulated metasurfaces in the near-infrared spectral regime. *APL Photonics*, 6(8). <https://doi.org/10.1063/5.0051815>
- Sanjari, P., & Aflatouni, F. (2025). A reconfigurable non-linear active metasurface for coherent wave down-conversion. *Nature Communications*, 16(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57132-x>
- Shameli, M. A., Magarotto, M., Capobianco, A. D., Schenato, L., Santagiustina, M., & De Ceglia, D. (2023). A Reflective Metalens With Tunable Focal Length for Millimeter Waves. *IEEE Access*, 11, 104191–104199. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3317511>
- Wadud, A. U., & Balajti, I. (202M). *Advanced Radar Signal Processing for*

Enhanced Object Detection in ADAS.

- Wang, Y., Cheng, J., Ji, Y., Fan, F., & Chang, S. (2024). Terahertz wide-angle metalens with nearly ideal object-image relation. *Chinese Optics Letters*, 22(1), 013701. <https://doi.org/10.3788/col202422.013701>
- Wang, Z., Liu, Q., Yan, M., Liang, J., & Zhou, D. (2023). Double-layer broadband transmission metasurface and its application in low sidelobe antenna. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(19). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acc40d>
- Wen, D., Yue, F., Li, G., Zheng, G., Chan, K., Chen, S., Chen, M., Li, K. F., Wong, P. W. H., Cheah, K. W., Yue Bun Pun, E., Zhang, S., & Chen, X. (2015). Helicity multiplexed broadband metasurface holograms. *Nature Communications*, 6(May), 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms9241>
- Xue, C., Lou, Q., & Chen, Z. N. (2020). Broadband Double-Layered Huygens' Metasurface Lens Antenna for 5G Millimeter-Wave Systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(3), 1468–1476. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2943440>
- Yan, B., & Roberts, I. P. (2025). Advancements in Millimeter-Wave Radar Technologies for Automotive Systems: A Signal Processing Perspective. *Electronics (Switzerland)*, 14(7), 1–28. <https://doi.org/10.3390/electronics14071436>
- Yan, D., Wang, Y., Qiu, Y., Feng, Q., Li, X., Li, J., Qiu, G., & Li, J. (2022). A Review: The Functional Materials-Assisted Terahertz Metamaterial Absorbers and Polarization Converters. *Photonics*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/photonics9050335>
- Zaker, R., & Sadeghzadeh, A. (2020). Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(11), 1–24. <https://doi.org/10.1002/mmce.22411>
- Zhao, L. R., Jiang, X. Q., Li, C. X., Gong, S. X., & Yu, W. X. (2023). High-NA and broadband achromatic metalens for sub-diffraction focusing of long-wavelength infrared waves. *Results in Physics*, 46(February), 106308. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106308>
- Zhu, Y., Zang, X., Chi, H., Zhou, Y., Zhu, Y., & Zhuang, S. (2023). Metasurfaces designed by a bidirectional deep neural network and iterative algorithm for generating quantitative field distributions. *Light: Advanced Manufacturing*, 4(2), 104–114. <https://doi.org/10.37188/lam.2023.009>