

ПОКРИТТЯ З ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ДЛЯ ПРОСВІТЛЕННЯ КРЕМНІЄВИХ ЛІНЗ НА ЧАСТОТІ 0,14 ТГц

К. т. н. А. В. Шевчик-Шекера, к. ф.-м. н. О. Г. Голенков, к. ф.-м. н. І. О. Лисюк,
к. ф.-м. н. В. О. Петряков*, М. Ю. Ковбаса, д. ф.-м. н. Ф. Ф. Сизов

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова,
*Інститут ядерних досліджень
Україна, м. Київ
shevchik-shekera@isp.kiev.ua

Розроблено та досліджено ефективність оптичного просвітлення лінз на частоті 0,14 ТГц поліетиленом високої щільності (HDPE) нанесеного на поверхні лінз, виготовлених з високоомного кремнію (HRFZ-Si). Сформовані з гранул тонкі плівки HDPE використано для ламінування HRFZ-Si лінз за допомогою точного пресування та процедури склеювання за температури $T \leq 130^\circ\text{C}$. Проведено моделювання просвітлювальних плівок з урахуванням вибраного матеріалу, частоти та кутів падіння випромінювання. Отримані експериментальні результати показали збільшення пропускання лінз з покриттям більше ніж у 1,45 рази.

Ключові слова: лінза, високоомний кремній, покриття, поліетилен високої щільності, ТГц.

Лінзи з високоомного кремнію (HRFZ-Si) широко використовують в приладах технічного бачення інфрачервоного (ІЧ) та терагерцевого (ТГц) діапазонів спектра [1, 2], крім того, вони мають, зокрема, й перспективи застосування в системах 6G-зв'язку. Проте висока діелектрична проникність HRFZ-Si ($\epsilon = 11,7$) призводить до значних оптичних втрат ($\approx 46\%$ на одній лінзі) і, як наслідок, низької ефективності передачі сигналів. Просвітлювальні покриття зменшують втрати на відбиття випромінювання, а у випадку нормального падіння на оптичну поверхню можуть повністю їх усунути за умов

$$n_{AR} = \sqrt{n_{Si}}; \quad d_{AR} = \frac{(2m+1)\lambda}{4n_{AR}} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

де n_{AR} , n_{Si} — відповідно, показники заломлення просвітлювального покриття та оптичного компонента, який просвітлюється (наприклад, кремній); d_{AR} — товщина покриття; λ — довжина хвилі випромінювання.

Для лінз з HRFZ-Si відомі різні типи просвітлювальних покриттів з високою стійкістю, наприклад покриття Suex ($n \approx 1,75$) [3], полімери парилену ($n = 1,62$), нанесені вакуумним напиленням, пряма обробка змішаними епоксидними смолами, глибоке реактивне травлення іонів та лазерна обробка просвітлювальних структур на оптичних поверхнях. Інші поширені пластмаси, такі як майлар (Maylar, $n \approx 1,73$) [4] та Каптон (Capton, $n \approx 1,88$) [5], є перспективними для використання як просвітлювальних покриттів, оскільки їхні показники заломлення близькі до необхідного значення: $n_{ideal} = n_{AR} \approx 1,85$. Однак такі матеріали можуть бути складними для застосування у невеликій вигнутій оптиці, такій як HRFZ-Si-лінзи. Щобільше, плівки Maylar мають у кілька разів більший коефіцієнт поглинання порівняно з HDPE ($\alpha < 2,5 \text{ см}^{-1}$) і при товщині сотні мікрметрів їх важче виготовити для ТГц-діапазону. Пластик поліетилен високої щільності (HDPE) відомий успішним використанням як новий субстрат для ІЧ-лінз методом прецизійного пресування [6]. Автори [7] успішно покрили обидві сторони вікна кремнію 20 мкм поліетиленом низької щільності LDPE ($n = 1,52$) для $\lambda = 118 \text{ мкм}$.

Застосування поліетиленових покриттів для просвітлення кремнію широко освітлено для ІЧ-діапазону довжини хвиль, для ТГц частот відомі лише поодинокі випадки. В цій роботі представлено моделювання та розрахунки властивостей HDPE-плівок з урахуванням вибраного матеріалу, частоти, кутів падіння випромінювання та технології формування, нанесення таких плівок на HRFZ-Si-лінзи. Просвітлювальне покриття було оптимізовано для частоти джерела 0,14 ТГц для $n_{HDPE} = 1,54$ та $m = 0$, що відповідає товщині плівки $t_{HDPE} \approx 350 \text{ мкм}$. Технологія нанесення HDPE-плівки поєднує пресування та склеювання при низьких температурах ($T \leq 130^\circ\text{C}$) для надійного поєднання покриття та лінзи за допомогою тонкого шару термопластичного клею. Спеціально розроблена технологія формування

HDPE-плівки з гранул дозволяє отримувати плівки різної форми (півкуля, сектор, плоска поверхня) та різної товщини. Розроблена конструкція камери дозволяє покрити сильно вигнуті лінзи з обох боків та масштабується для великих лінз. На рис. 1, а показано зсув максимумів пропускання в область більших частот при зменшенні показника заломлення покриття порівняно з оптимальним показником заломлення ($n_{ideal} = 1,85$). Залежність коефіцієнта пропускання від кутів падіння випромінювання для s - та p -поляризації на частоті 0,14 ТГц представлено рис. 1, б.

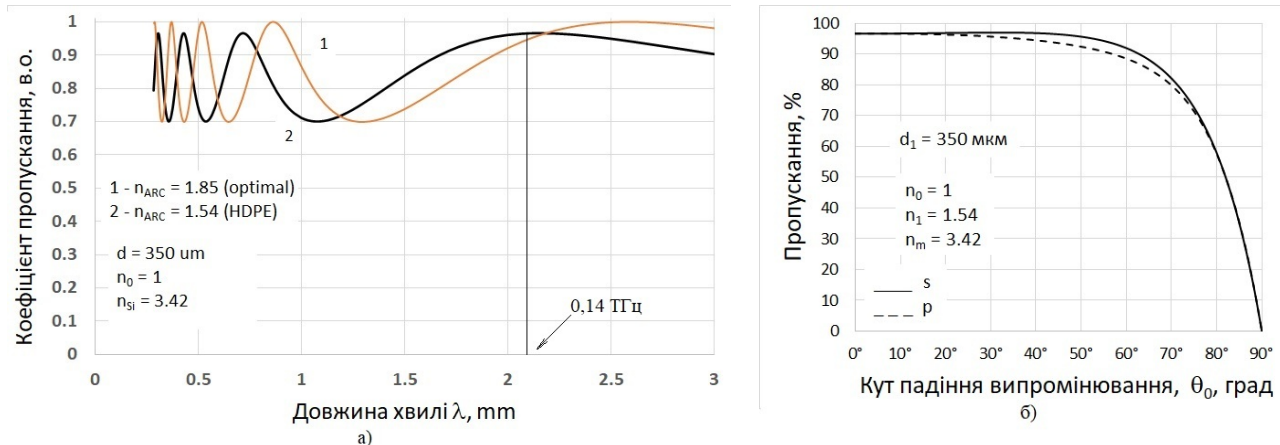


Рис. 1. Залежність коефіцієнта пропускання однієї поверхні від довжини хвилі (а) та від кута падіння випромінювання для s - та p -складових поляризації (б) для покриття товщиною 350 мкм

Таким чином, визначено оптимальну товщину HDPE-плівки: $t_{HDPE} \approx 350$ мкм для частоти 0,14 ТГц, яку було нанесено на поверхню Si-лінзи діаметром 8 мм та радіусом кривизни 12 мм. Використане HDPE-покриття забезпечує збільшення прозорості випромінювання HRFZ-Si-лінз приблизно у 1,45 раза на частоті випромінювання 0,14 ТГц. Значною перевагою у виборі HDPE як просвітлювального покриття є те, що показник заломлення цього матеріалу є ахроматичним у широкому діапазоні частот. Вибрана технологія виробництва дозволяє виготовляти плівки різної форми та наносити їх на поверхню лінз з різних боків навіть на сильно вигнуті поверхні.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Wheeler J.D., Koopman B., Gallardo P. et al. Antireflection coatings for submillimeter silicon lenses. *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII*, 2014, *Proc. SPIE*, 9153, p. 91532Z-1.
2. Llombart N., Chattopadhyay G., Skalare A., Mehdi I. Novel terahertz antenna based on a silicon lens fed by a leaky wave enhanced waveguide. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011, vol. 59, no. 6, pp. 2160–2168.
3. Sahin S., Nahar N., Sertel K. Thin-film SUEX as an anti-reflection coating for mmW and THz applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019, vol. 9, no. 4, pp. 417–421.
4. Jin Y.-S., Kim G.-Ju, Jeon S.-G. Terahertz dielectric properties of polymers. *J. Korean Phys. Soc.* 2006, vol. 49, no. 2, pp. 513–517.
5. Cunningham P., Valdes N., Vallejo F. et al. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials. *J. Appl. Phys.* 2011, vol. 109, no. 4, pp. 043505.
6. Manaf A., Sugiyama T., Yan J. Design and fabrication of Si-HDPE hybrid Fresnel lenses for infrared imaging systems. *Opt. Exp.* 2017, vol. 25, no. 2, pp. 1202–1220.
7. Englert C.R., Birk M., Maurer H. Antireflection coated, wedged, single-crystal silicon aircraft window for the far-infrared. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 1999, vol. 37, no. 4, pp. 1997–2003.

A. V. Shevchik-Shekera, O. G. Golenkov, I. O. Lysiuk, V. O. Petriakov, M. Yu. Kovbasa, F. F. Sizov

Silicon lenses with HDPE anti-reflection coatings for THz frequency range

The efficiency of the anti-reflection (AR) high-density polyethylene (HDPE) coatings on the high resistance floating-zone silicon (HRFZ-Si) lenses for the terahertz (THz) frequency range ($\nu \approx 0.14$ THz) has been developed and investigated. HDPE thin films formed from the pellets were used for laminating HRFZ-Si lenses by accurate press molding and bonding procedures at temperatures below $T \leq 130^\circ\text{C}$. The mathematical model and calculations of the antireflective properties of films including the selected material, frequency and angles of falling radiation are given. Experimental results showed an increase in the transmittance coefficient of HDPE coating up to ≈ 1.45 times.

Keywords: HRFZ-Si lens, anti-reflection HDPE coatings, THz.